



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
DEPARTAMENT DE MATEMÀTICA APLICADA

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS Y CONTROL ESTADÍSTICO DE  
LA CALIDAD APLICADO A LA  
EFICIENCIA ENERGÉTICA DE  
SISTEMAS EMBARCADOS EN BUQUES  
DE GUERRA**

Autor: Pedro Jesús Carrasco Pena

---

Directores:

Pedro Fernández de Córdoba Castellá  
Sonia Zaragoza Fernández

**Valencia, diciembre de 2019**

**ANÁLISIS Y CONTROL ESTADÍSTICO DE  
LA CALIDAD APLICADO A LA EFICIENCIA  
ENERGÉTICA DE SISTEMAS EMBARCADOS  
EN BUQUES DE GUERRA**

Pedro Jesús Carrasco Pena

Diciembre de 2019

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
1.1. Motivación del trabajo . . . . .	4
1.2. Caracterización del problema . . . . .	5
1.3. Hipótesis y objetivos . . . . .	6
1.4. Metodología . . . . .	7
<b>2. Estado del arte</b>	<b>9</b>
2.1. Definición de buque de guerra y EE . . . . .	9
2.2. Evolución histórica del buque de guerra . . . . .	12
2.2.1. Clasificación de los buques de guerra . . . . .	14
2.2.2. Los sistemas de generación de energía embarcados . . . . .	16
2.3. Parámetros de diseño del buque de guerra . . . . .	21
2.3.1. Dimensiones principales y estudio estático . . . . .	21
2.3.2. Estudio dinámico . . . . .	24
2.4. El consumo energético en buques de guerra . . . . .	25
2.4.1. La propulsión . . . . .	25
2.4.2. Gobierno del buque . . . . .	27
2.4.3. Balance eléctrico del buque . . . . .	27
2.4.4. Estructura analítica del buque de guerra . . . . .	30
2.4.5. Modos de navegación del buque de guerra . . . . .	31
2.5. Gestión energética y la ISO 50001 . . . . .	33
2.6. Normativa de EE en el sector naval . . . . .	34
2.6.1. El EEDI . . . . .	35
2.6.2. El SEEMP . . . . .	38
2.6.3. El EEOI . . . . .	40
2.6.4. El SNV . . . . .	41
2.6.5. El SRDCCB . . . . .	42
2.7. Técnicas y tecnologías para la mejora de la EE . . . . .	43
2.7.1. Mejoras en el diseño del buque . . . . .	44
2.7.2. Mejoras aplicadas a los sistemas embarcados . . . . .	47
2.7.3. Mejoras en el uso de los combustibles . . . . .	49
2.7.4. Mejoras y estudios en EE de las marinas de guerra . . . . .	51
2.8. Herramientas matemáticas para la EE . . . . .	53
2.8.1. Matemática estadística . . . . .	53
2.8.2. Control estadístico de la calidad de procesos . . . . .	65
2.8.3. Gráficos de control . . . . .	71
2.8.4. Gráficos de control multivariante . . . . .	81
2.8.5. Gráficos de control por atributos . . . . .	84

2.8.6. Medida del desempeño por el procedimiento ARL . . . . .	86
2.8.7. Algoritmos exactos y aproximados . . . . .	87
2.8.8. Heurística y metaheurística . . . . .	87
2.8.9. Algoritmos genéticos (GA) . . . . .	91
2.8.10. Modelos y regresiones . . . . .	93
2.9. Sistema, variable y modelado . . . . .	99
2.10. Análisis de variables de los sistemas energéticos . . . . .	101
2.11. Simulación de modelos de sistemas energéticos . . . . .	102
2.12. Conclusiones del capítulo . . . . .	103
<b>3. Trabajo de campo</b>	<b>105</b>
3.1. Documentación técnica empleada y capacitación . . . . .	105
3.2. Caracterización del sistema objeto de estudio . . . . .	105
3.2.1. El balance eléctrico de la F-105 y su reparto . . . . .	107
3.3. Caracterización del entorno geográfico y temporal . . . . .	118
3.3.1. Coordenadas geográficas . . . . .	118
3.3.2. Husos horarios . . . . .	119
3.3.3. Cálculo de las distancias recorridas sobre el Globo . . . . .	121
3.3.4. Descripción de los desplazamientos respecto del tiempo . . . . .	124
3.3.5. Caracterización de los desplazamientos oceánicos . . . . .	127
3.4. Los viajes . . . . .	128
3.5. Variables consideradas . . . . .	129
3.6. Herramientas empleadas en la toma de datos . . . . .	134
3.6.1. El SICP . . . . .	134
3.6.2. La estación meteorológica . . . . .	138
3.6.3. Datos de consumo de combustible . . . . .	140
3.7. Características de las bases de datos . . . . .	141
3.7.1. Dimensiones de las matrices de datos . . . . .	143
3.8. Desglose de las STD . . . . .	144
3.8.1. Datos del viaje de pruebas en Ferrol . . . . .	145
3.8.2. Datos del viaje de Cádiz a Ferrol . . . . .	145
3.8.3. Datos del viaje a EE.UU. . . . .	146
3.8.4. Datos del viaje a Australia . . . . .	147
3.9. Preparación y ordenación de los datos . . . . .	148
3.10. Validación de los datos . . . . .	149
3.11. Conclusiones del capítulo . . . . .	150
<b>4. Análisis de los datos</b>	<b>152</b>
4.1. Análisis del balance energético de diseño . . . . .	152
4.2. Análisis gráfico de los datos . . . . .	156
4.2.1. Análisis gráfico del viaje de prueba en Ferrol . . . . .	156
4.2.2. Análisis gráfico del viaje de Cádiz a Ferrol . . . . .	159
4.2.3. Análisis gráfico del viaje a EE.UU. . . . .	163
4.2.4. Análisis gráfico del viaje a Australia . . . . .	169
4.3. Análisis de correlaciones . . . . .	173
4.3.1. Correlaciones del viaje de prueba en Ferrol . . . . .	174
4.3.2. Correlaciones del viaje de Cádiz a Ferrol . . . . .	176
4.3.3. Correlaciones del viaje a EE.UU. . . . .	180

4.3.4. Correlaciones del viaje a Australia . . . . .	186
4.4. Análisis de gráficos de control . . . . .	193
4.4.1. Gráficos de control del viaje de prueba en Ferrol . . . . .	194
4.4.2. Gráficos de control del viaje de Cádiz a Ferrol . . . . .	198
4.4.3. Gráficos de control de los viajes de EE.UU. y Australia . . . . .	202
4.5. Cálculo y análisis del EEOI . . . . .	209
4.5.1. El EEOI del buque analizado . . . . .	210
4.5.2. Análisis del consumo de combustible . . . . .	215
4.5.3. Análisis del EEOI calculado en base a los modos . . . . .	217
4.5.4. Comparación del EEOI calculado con el de mercantes . . . . .	219
4.6. Simulación numérica . . . . .	220
4.7. Planteamiento de un modelo de regresión lineal múltiple de consumo	223
4.8. Conclusiones del capítulo . . . . .	226
<b>5. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>229</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	229
5.2. Líneas futuras . . . . .	230
<b>Bibliografía</b>	<b>230</b>

# Índice de figuras

1.1. Pasos iniciales de la tesis. Elaboración propia (2016) . . . . .	8
2.1. Esquema de un buque de escolta. Elaboración propia (2016) . . . . .	10
2.2. Distribución esquemática de espacios. Elaboración propia (2016) . . .	11
2.3. Evolución de los buques de guerra. Elaboración propia (2017) . . . . .	14
2.4. Comparación de tipos de buques. Elaboración propia (2017) . . . . .	17
2.5. Relación desplazamiento y potencia. Rolls Royce (2018) . . . . .	20
2.6. Esloras representativas del buque. Elaboración propia (2016) . . . . .	21
2.7. Parámetros de B, T, D, FB, Af y Am. Elaboración propia (2018) . . . . .	22
2.8. Resistencia al avance. Elaboración propia (2018) . . . . .	25
2.9. Potencias y rendimientos. Elaboración propia (2018) . . . . .	27
2.10. Esquema de desarrollo del balance. Elaboración propia (2016) . . . . .	33
2.11. Reglamentación en EE. Elaboración propia (2018) . . . . .	43
2.12. Reducción peso empleando HTS. Elaboración con datos de ABS (2013)	47
2.13. Curva de distribución normal. Elaboración propia (2018) . . . . .	58
2.14. Representación gráfica de regresión lineal. Elaboración propia (2018)	64
2.15. Gráfico de proceso tipo. Elaboración propia (2018) . . . . .	67
2.16. Gráfico causa efecto. Elaboración propia (2018) . . . . .	67
2.17. Gráfico de Pareto. Elaboración propia (2018) . . . . .	68
2.18. Gráfico tipo histograma. Elaboración propia (2018) . . . . .	68
2.19. Gráfico de recorrido. Elaboración propia (2018) . . . . .	69
2.20. Gráfico de control de proceso. Elaboración propia (2018) . . . . .	69
2.21. Gráfico de regresión dispersión. Elaboración propia (2018) . . . . .	70
2.22. Tipología de los procesos. Elaboración propia (2017) . . . . .	72
2.23. Gráfico de medias. Elaboración propia (2018) . . . . .	73
2.24. Gráfico Shewhart. Elaboración propia (2018) . . . . .	76
2.25. Datos para gráficos de Shewhart. Fuente internet (2017) . . . . .	76
2.26. Gráfico CUSUM fuera de control. Elaboración propia (2018) . . . . .	78
2.27. Gráfico V-Mask. Elaboración propia (2018) . . . . .	78
2.28. Gráfico de control EWMA. Elaboración propia (2018) . . . . .	80
2.29. Gráfico de control de MM. Elaboración propia (2018) . . . . .	81
2.30. Gráfico del estadístico de Hotelling. Elaboración propia (2018) . . . . .	83
2.31. Funcionamiento de un algoritmo. Elaboración propia (2018) . . . . .	90
2.32. Funcionamiento de un AG simple. Elaboración propia (2018) . . . . .	93
2.33. Obtención del modelo. Elaboración propia (2018) . . . . .	94
2.34. Modelo de regresión lineal. Elaboración propia (2018) . . . . .	95
2.35. Modelo de regresión lineal 3D. Elaboración propia (2018) . . . . .	96
2.36. Función no convexa. Elaboración propia (2018) . . . . .	98

2.37. Sistema buque. Elaboración propia (2018) . . . . .	100
2.38. Proceso de análisis de datos. Elaboración propia (2016) . . . . .	102
3.1. Modelo 3D. Elaboración propia (2017) . . . . .	106
3.2. Distribución de consumidores. Elaboración propia (2016) . . . . .	108
3.3. Las diez SCE de la fragata. Elaboración propia (2016) . . . . .	108
3.4. Peso del HVAC en cada SCE. Elaboración propia (2016) . . . . .	110
3.5. Esquema del circuito HVAC. Manual del sistema (2012) . . . . .	111
3.6. Esquema de las unidades y circuito. Manual del sistema (2012) . . . . .	115
3.7. Esquema refrigeración de los diésel. Manual del sistema (2013) . . . . .	115
3.8. Especificación técnica del refrigerante R134-a. Ficha técnica (2012) . . . . .	116
3.9. Espacios de máquinas. Elaboración propia (2016) . . . . .	117
3.10. Tomas y descargas, esquema. Elaboración propia (2019) . . . . .	118
3.11. Viaje a Norfolk. Elaboración con <i>HM N. Almanac Office (UK)</i> (2016) . . . . .	119
3.12. Coordenadas geográficas. Elaboración propia (2016) . . . . .	120
3.13. Mapa de husos horarios área del viaje. Elaboración propia (2016) . . . . .	121
3.14. Definición del triángulo esférico. Elaboración propia (2016) . . . . .	123
3.15. Área sobre la que se desarrolló el tránsito. Elaboración propia (2016) . . . . .	125
3.16. Puntos de cambio horario. Elaboración propia (2016) . . . . .	126
3.17. Viajes analizados en el estudio. Elaboración propia (2017) . . . . .	129
3.18. Rumbo y velocidad. Elaboración propia (2017) . . . . .	133
3.19. Presentación de datos de navegación. Foto de pantalla (2017) . . . . .	135
3.20. Presentación de datos en tiempo real. Foto de pantalla (2017) . . . . .	135
3.21. Presentación datos históricos múltiples. Foto de pantalla (2017) . . . . .	136
3.22. Presentación sistema HVAC. Foto de pantalla (2017) . . . . .	136
3.23. Presentación control de temperatura. Foto de pantalla (2017) . . . . .	137
3.24. Esquema de la integración de datos. Elaboración propia (2017) . . . . .	138
3.25. Esquema de la estación meteorológica. Elaboración propia (2017) . . . . .	139
3.26. Ubicación de la estación meteorológica. Elaboración propia (2017) . . . . .	140
3.27. Ubicación espacios de máquinas. Elaboración propia (2017) . . . . .	141
3.28. Ejemplo de gráfico de datos. Elaboración propia (2018) . . . . .	142
3.29. Proceso de digitalización. Elaboración propia (2018) . . . . .	143
3.30. Hojas de variables. Elaboración propia (2019) . . . . .	148
4.1. Consumos modos en verano. Elaboración propia (2019) . . . . .	152
4.2. Consumos modos en invierno. Elaboración propia (2019) . . . . .	153
4.3. Combinaciones viaje a Australia. Elaboración propia (2019) . . . . .	153
4.4. Combinaciones viaje a EE.UU. Elaboración propia (2019) . . . . .	155
4.5. Combinaciones viaje de Cádiz . Elaboración propia (2019) . . . . .	155
4.6. Variables del viaje nº 1 de prueba (Ferrol). Elaboración propia (2019) . . . . .	157
4.7. Variables analizadas. Viaje nº1 de prueba. Elaboración propia (2019) . . . . .	158
4.8. Viaje 2 Cádiz Ferrol. Elaboración propia (2019) . . . . .	159
4.9. Consumos del viaje 2. Elaboración propia (2019) . . . . .	160
4.10. Variable PT y consumo F-76 del viaje 2. Elaboración propia (2019) . . . . .	161
4.11. Variables PT y $T_{am}$ del viaje 2. Elaboración propia (2019) . . . . .	162
4.12. Variables PT y HR del viaje 2. Elaboración propia (2019) . . . . .	162
4.13. Variables PT y $T_a$ del viaje 2. Elaboración propia (2019) . . . . .	163
4.14. Viaje 3 a EE.UU. Elaboración propia (2019) . . . . .	164
4.15. Consumos F-76 viaje 3. Elaboración propia (2019) . . . . .	164

4.16. Variable PT viaje 3. Elaboración propia (2019) . . . . .	165
4.17. Variables PT y consumo DD.GG. viaje 3. Elaboración propia (2019) . .	165
4.18. Variables PT y HVAC viaje 3. Elaboración propia (2019) . . . . .	166
4.19. Variables PT y $T_{am}$ del viaje 3. Elaboración propia (2019) . . . . .	166
4.20. Variables PT y HR del viaje 3. Elaboración propia (2019) . . . . .	167
4.21. Variables PT y $T_a$ del viaje 3. Elaboración propia (2019) . . . . .	168
4.22. Variables PT Temperatura DD.GG. viaje 3. Elaboración propia (2019)	168
4.23. Viaje 4 a Australia. Elaboración propia (2019) . . . . .	169
4.24. Variables $T_{am}$ , PT y consumo DD.GG. viaje 4. Elaboración propia (2019)	170
4.25. Variables PT y $T_{am}$ en viaje 4. Elaboración propia (2019) . . . . .	170
4.26. Variables PT y $v_{sf}$ en viaje 4. Elaboración propia (2019) . . . . .	171
4.27. Variables $v_{ra}$ y $D_{ra}$ en viaje 4. Elaboración propia (2019) . . . . .	172
4.28. Variables PT y HR en viaje 4. Elaboración propia (2019) . . . . .	172
4.29. Variables PT y $T_a$ en viaje 4. Elaboración propia (2019) . . . . .	173
4.30. Gráfico de dispersión P.E. Viaje n°1. Elaboración propia (2019) . . . .	176
4.31. Viaje 2: valores de correlación sin modos. Elaboración propia (2019) .	177
4.32. Viaje 2: valores de correlación modo P.E. Elaboración propia (2019) .	178
4.33. Viaje 2: valores de correlación modo O. Elaboración propia (2019) . .	179
4.34. Viaje 2: valores de correlación modo C.R. Elaboración propia (2019) .	179
4.35. Viaje 2: recta de regresión (PT-Tam). Elaboración propia (2019) . . . .	180
4.36. Viaje 3: correlaciones de datos completos. Elaboración propia (2019) .	181
4.37. Viaje 3: correlaciones de 06:00 a 14:00 h. Elaboración propia (2019) .	182
4.38. Viaje 3: correlaciones de 15:00 a 23:00 h. Elaboración propia (2019) .	182
4.39. Viaje 3: correlaciones completo por horas. Elaboración propia (2019) .	183
4.40. Viaje 3: correlaciones de modo puerto (P.A.). Elaboración propia (2019)	184
4.41. Viaje 3: correlaciones de modo puerto (P.E.). Elaboración propia (2019)	184
4.42. Viaje 3: correlaciones en modo crucero (C.R.). Elaboración propia (2019)	185
4.43. Viaje 3: correlaciones en operación (O.). Elaboración propia (2019) . .	185
4.44. Viaje 3: correlaciones del HVAC. Elaboración propia (2019) . . . . .	186
4.45. Viaje 4: uso de los motores DD.GG. Elaboración propia (2019) . . . .	187
4.46. Viaje 4: correlaciones de la etapa 1. Elaboración propia (2019) . . . .	188
4.47. Viaje 4: temperatura del mar etapa 1. Agencia DWD (2017) . . . . .	189
4.48. Viaje 4: correlaciones de la etapa 2. Elaboración propia (2019) . . . .	191
4.49. Viaje 4: correlaciones de la etapa 3. Elaboración propia (2019) . . . .	191
4.50. Viaje 4: correlaciones de la etapa 4. Elaboración propia (2019) . . . .	192
4.51. Viaje 4: correlaciones de la etapa 5. Elaboración propia (2019) . . . .	192
4.52. Gráfica de control de rangos (viaje 1). Elaboración propia (2019) . . .	195
4.53. Gráfica de control de medias (viaje 1). Elaboración propia (2019) . . .	195
4.54. Gráfica de control tipo EWMA (viaje 1). Elaboración propia (2019) . .	196
4.55. Gráfica de control tipo CUSUM (viaje 1). Elaboración propia (2019) .	196
4.56. Gráfica de control tipo CUSUM (2) (viaje 1). Elaboración propia (2019)	197
4.57. Gráfica de control de Media móvil (viaje 1). Elaboración propia (2019)	197
4.58. Gráfica de control de rangos (viaje 2). Elaboración propia (2019) . . .	198
4.59. Gráfica de control de medias (viaje 2). Elaboración propia (2019) . . .	199
4.60. Gráfica de control EWMA (viaje 2). Elaboración propia (2019) . . . .	199
4.61. Gráfica de CUSUM (viaje 2). Elaboración propia (2019) . . . . .	200
4.62. Gráfica de control CUSUM 2 (viaje 2). Elaboración propia (2019) . . .	200
4.63. Gráfica de control de Media móvil (viaje 2). Elaboración propia (2019)	201

4.64. Viajes 3 y 4: gráficos de rangos. Elaboración propia (2019) . . . . .	204
4.65. Viajes 3 y 4: gráficos de medias. Elaboración propia (2019) . . . . .	205
4.66. Viajes 3 y 4: gráficos EWMA. Elaboración propia (2019) . . . . .	206
4.67. Viajes 3 y 4: gráficos CUSUM. Elaboración propia (2019) . . . . .	207
4.68. Viajes 3 y 4: gráficos CUSUM (2). Elaboración propia (2019) . . . . .	208
4.69. Viajes 3 y 4: gráficos de Medias móviles. Elaboración propia (2019) . .	209
4.70. Distribución del ciclo de vida del buque. Elaboración propia (2019) .	210
4.71. Condiciones entre 2013 y 2016. Elaboración propia (2019) . . . . .	212
4.72. Viajes considerados entre 2012 y 2017. Elaboración propia (2019) . .	213
4.73. Puertos. Elaboración propia (2019) . . . . .	214
4.74. Consumo de DD.GG. en puerto. Elaboración propia (2019) . . . . .	215
4.75. Consumo de DD.GG. en el mar. Elaboración propia (2019) . . . . .	216
4.76. Consumo de MM.PP. en puerto. Elaboración propia (2019) . . . . .	216
4.77. Consumo de MM.PP. en el mar. Elaboración propia (2019) . . . . .	217
4.78. Valores del EEOI por modos y años. Elaboración propia (2019) . . . .	218
4.79. Datos tabulados de las navegaciones. Elaboración propia (2017) . . . .	218
4.80. EEOI frente a la Vm del viaje. Elaboración propia (2017) . . . . .	220
4.81. Formas de buque considerado y mallado para computación. (2017) . .	222
4.82. Simulación numérica de nuestro buque (2017) . . . . .	222
4.83. Esquema de planta de cuatro DD.GG. Elaboración propia (2017) . . .	224

# Índice de cuadros

2.1. Comparativas de buques: tipo y propulsión. Elaboración propia (2018)	19
2.2. Valores de Ksr. Elaboración propia (2016)	29
2.3. Hoja de cálculo para las SCEi. Elaboración propia (2016)	30
2.4. Coeficientes de conversión a CO <sub>2</sub> . OMI CIRC. 684 (2018)	40
2.5. Unidades de masa según tipo. Elaboración propia (2018)	41
2.6. Acciones sobre el diseño. Elaboración propia (2018)	46
2.7. Uso de acero HTS y materiales ligeros. Elaboración propia (2018)	46
2.8. Medidas de mejora de sistemas. Elaboración propia (2018)	49
2.9. Medidas de reducción del consumo. Elaboración propia (2018)	51
2.10. Tablas de frecuencias. Elaboración propia (2018)	56
2.11. Tabla de nivel de confianza. Elaboración propia (2018)	60
2.12. Tabla de datos de correlación. Elaboración propia (2018)	62
2.13. Tabla dicotómica. Elaboración propia (2018)	63
3.1. Dimensiones principales del buque. Elaboración propia (2016)	106
3.2. Valores de potencias máximas consumidas. Elaboración propia (2018)	109
3.3. Distribución del ciclo de vida (LCC). Datos Armada Española (2016)	109
3.4. Condiciones ambientales de diseño para el buque seleccionado.	111
3.5. Correspondencias de husos horarios (2017)	120
3.6. Coordenadas geográficas de los puertos (2016)	122
3.7. Distancias reales ( <i>nm</i> ) (1,852 <i>m</i> ). Elaboración propia (2016)	123
3.8. Duración de la primera navegación oceánica. Elaboración propia (2016)	124
3.9. Cambios de hora en el viaje de ida y vuelta. Elaboración propia (2016)	126
3.10. Tabla de variables por viaje. Elaboración propia (2018)	133
3.11. Número de mediciones. Elaboración propia (2018)	144
3.12. Modos, duración, consumo y millas. Elaboración propia (2019)	148
4.1. Horas por diésel y número de DD.GG. Elaboración propia (2019)	154
4.2. Coeficientes de Pearson del viaje 1. Elaboración propia (2019)	174
4.3. Viaje 1 resumen de los gráficos de control. Elaboración propia (2019)	201
4.4. Viaje 2 resumen de los gráficos de control. Elaboración propia (2019)	201
4.5. Viajes 3 y 4: resumen de valores límite. Elaboración propia (2019)	203
4.6. En % por modo de funcionamiento. Elaboración propia (2019)	212
4.7. Valor del EEOI promedio anual. Elaboración propia (2019)	213
4.8. Valores del EEOI por condición. Elaboración propia (2019)	217

# Lista de acrónimos

<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
2PD	Termostato digital de dos posiciones
AC	Corriente Alterna / Alternate Current
ANEP	Allied Naval Engineering Publication
ARL	Valor promedio de recorrido
BD	Base de Datos / Big Data
BT	Baterías
C.I.	Contra Incendios
C.R.	Crucero
CC	Serpentines de Conducto
CEC	Control estadístico de la calidad
CEP	Control Estadístico de Procesos
CF	Correction Factor
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIC	Centro de Información en Combate
CODAG	COmbined Diesel And Gas
CODOG	COmbined Diesel Or Gas
COEOD	COmbined Electric Or Diesel
COEOG	COmbined Electric Or Gas
COEOS	COmbined Electric Or Steam
COGAG	COmbined Gas And Gas
COGAS	COmbined Gas And Steam
COGES	COmbined Gas Electric Steam
COGOG	COmbined Gas Or Gas
CONAG	COmbined Nuclear And Gas
CR	Robótica Colaborativa
CTQ	VARIABLES CRÍTICAS PARA LA CALIDAD
CUD	Centro Universitario de la Defensa
CUSUM	Cumulative Sum
CV	Caldera de Vapor
CWA	Unidades de enfriamiento de agua
DA	Data Analytics
DC	Corriente Continua / Direct Current
DD.GG.	Diésel Generadores
DDS	Design Data Sheet
DEBD	Diesel Electric Booster Drive
DoE	Design of Experiments
DP	Diésel Propulsor

<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
EC	Especificaciones de Contrato
EE	Eficiencia Energética
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operational Index
EL	Propulsor Eléctrico
ESM	Electronic Support Measures
ESWBS	Expanded Ship Work Breakdown Structure
EWMA	Exponentially Weighted Moving Average
F.	Fondeado
FB	Francobordo
FC	Fan-Coil
FCS	Fire Control System
FLIR	Forward Looking Infrared
FMEA	Análisis de Modo y Efecto de las Fallas
GA	Algoritmo Genético / Genetic Algorithm
GC	Serpentines de Gravedad
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GNL	Gas Natural Licuado
GPS	Global Positioning System
GRA	Grey Relation Analysis
GRASP	Greedy Randomised Adaptive Search Procedures
GT	Turbo Generador de Vapor
GUI	Graphical Umbilical Interface
HFO	Heavy Fuel Oil
HR	Humedad relativa
HTS	Aceros de Alta Resistencia
HVAC	Heating Ventilation and Air Conditioning
IA	Inteligencia Artificial
ICMP	Integrated Platform Management System
IEA	International Energy Agency
IMO	International Maritime Organisation
IoT	Internet of Things
IIoT	Industrial Internet of Things
kn	Unidad para la velocidad en nudos del inglés “knot”
kW	Kilovatio
kWh	Kilovatio hora
L.C.	Límite de Control
LAI	Límite de Aviso Inferior
LAS	Límite de Aviso Superior
LC	Línea Central
LCC	Life Cycle Cost / Coste de ciclo de vida
LCI	Límite de Control Inferior
LCS	Límite de Control Superior
LFO	Light Fuel Oil
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
M2M	Machine to Machine
MARPOL	Convenio para la prevención de la polución marina
MC	Métodos de Monte Carlo
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
MCUSUM	Multivariate Cumulative Sum
MD	Minería de Datos
MEPC	Comité de protección del medio marino
MEWMA	Multivariate Exponentially Weighted Moving Average
MIU	Meteorological Interface Unit
MK-xx	Mark (marca) y modelo (xx)
MM	Media Móvil
MM.PP.	Motores principales de propulsión
MW	Mega-Watt
N.A.	No Aplica
n.d.	No Disponible
nm	Millas náuticas / Nautic Mile
NRBQ	Nuclear, Radiológica, Biológica y Química
O.	Navegando
OMI	Organización Marítima Internacional
OTAN	Organización del Tratado Atlántico Norte
P.A.	Puerto Apagado
P.A.N.	Puerto Apagado y Navegando
P.E.	Puerto Encendido
P.E.N.	Puerto Encendido y Navegando
PNEE	Plan Nacional de Eficiencia Energética
QSPI	Quad Serial Peripheral Interface
RADAR	Radio Detection and Ranging
RN	Reactor Nuclear
RNA	Redes Neuronales Artificiales
RTU	Remote Terminal Unit
SC	Sistema de Combate
SCE	Situación de Carga Eléctrica
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SICP	Sistema Integrado de Control de Plataforma
SNV	Seguimiento Notificación y Verificación
SRDCCB	Sistema Recopilación de Datos Consumo de Combustible Buques
STD	Series Temporales de Datos
TBS	Temperatura ambiente
TEU	Twenty foot Equivalent Unit
TG	Turbina de Gas
TI	Temperatura interior / Tecnologías de la Información
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TM	Temperatura del agua de mar
Tn	Toneladas
TRB	Tonelaje de Registro Bruto
TTJ	Temperature Transmission Junction

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
TV	Turbina de Vapor
UC	Unidades de Refrigeración
UE	Unión Europea
UTC	Universal Time Cordinate
VLS	Vertical Launching System

*A mi mujer Paula y a nuestras  
hijas Paula, Ana y Marina.*

# Agradecimientos

*Quiero agradecer a la Armada su desinteresada colaboración, facilitando la toma de datos para la elaboración de esta tesis doctoral sin la cual este análisis no habría sido posible y, especialmente, quiero recalcar la ayuda recibida por las dotaciones que, a lo largo de los años de elaboración de esta tesis, han pasado por la fragata “Cristóbal Colón”. En el ámbito académico, tengo que agradecer al profesor de la Universidade da Coruña (UDC) Dr. Javier Tarrío Saavedra, su desinteresada ayuda en los primeros pasos de esta tesis, esta fue determinante en la consecución de los objetivos marcados en la misma. No puedo olvidar tampoco en el plano académico, a los doctores Humberto Michinel Álvarez, Ángel Paredes Galán y Ricardo Bendaña Jácome de la Universidade de Vigo; a ellos gracias por su aportación y consejo fundamental en la consecución de hitos tan importantes como las publicaciones que complementan esta tesis. Por último, agradezco a mis directores, Dr. Pedro Fernández de Córdoba Castellá y Dra. Sonia Zaragoza Fernández, su constante atención, apoyo, paciencia y confianza durante estos años en los que hemos desarrollado esta tesis.*

# Resumen

*En todos los sistemas energéticos influyen gran cantidad de variables dinámicas, así definidas por su relación de dependencia respecto del tiempo. Debido a la gran cantidad de variables que definen los sistemas energéticos, se complica cualquier actuación que busque, dentro del campo de la optimización y gestión de la Eficiencia Energética (EE), su mejora.*

*Por esta razón, tanto las organizaciones públicas como privadas, promueven la obtención y desarrollo de nuevos procedimientos matemáticos que permitan tratar la complejidad de las variables implicadas en las instalaciones energéticas y extraer adecuadamente la información que proporcionan de los sistemas energéticos, de cara a lograr alcanzar realmente los objetivos de EE internacionalmente acordados.*

*La mayoría de los estudios que se han realizado desde finales del siglo XX se han centrado en su mayoría en el campo de la ingeniería civil, donde existen innumerables estudios matemáticos orientados a la mejora de la EE que, por ejemplo, han permitido reducir los costes de producción y distribución, el consumo de combustibles fósiles, la emisión de gases de efecto invernadero o el coste de ciclo de vida.*

*Esta proliferación de estudios, con el consiguiente aumento del conocimiento, no se ha producido al mismo nivel dentro del sector naval y mucho menos en el caso de los buques de guerra, campo en el que la literatura científica existente es escasa, tanto en cantidad como en casos estudiados.*

*Partiendo de esta constatación, la presente tesis doctoral tiene como objetivo principal el análisis exhaustivo del estado actual de los sistemas energéticos de los buques de guerra y la aplicación de procedimientos matemáticos en este ámbito, enmarcados dentro del control estadístico de la calidad (CEC) industrial.*

*Se identificarán en primer lugar las variables críticas para la calidad (CTQ) de los sistemas energéticos del buque, en sus diferentes modos de funcionamiento como pueden ser los de fondeado, navegando o en puerto; se medirán, se analizarán y se estimarán para facilitar la inferencia o predicciones de sus valores respecto del tiempo; se controlarán y mejorarán mediante la aplicación de herramientas de Minería de Datos (MD) (análisis exploratorio), CEC y ajuste de modelos de series de tiempo.*

*Con todo esto, se podrán estimar y calcular las correlaciones existentes entre las CTQ, predecir sus valores (con intervalos de confianza), definir y detectar alarmas, tendencias y patrones en los datos proporcionados por los sistemas energéticos que permitan descubrir posibilidades de mejora de su EE a través de la búsqueda fundamental de causas asignables.*

*Esto permitirá establecer líneas de acción para la modificación y diseño de los sistemas embarcados en buques de guerra existentes y futuros, así como ofrecer bases para implantar sistemas de gestión energética automática e inteligentes a través de la automatización de procesos.*

# Abstract

*The energy production and consumption systems are affected by a large number of dynamic variables. Thus, these variables are defined by their relationship and its dependence in time. Due to, the number and typology of variables which are present in energy systems is very large. So, the actions developed to seek for Energy Efficiency improvement and optimization is too complicated.*

*For this reason, public and private organizations promote the acquisition and development of new mathematical procedures that allow dealing with the complexity of the variables involved in energy installations and to extract the information which the data provide from the energy systems. In order to achieve the objectives marked on international agreements, and treaties about energy efficiency.*

*Most of the studies which have been conducted since the late 20<sup>th</sup> Century have focused on the field of civil engineering mostly. There are countless mathematical studies aimed on improving energy efficiency, which have made it possible to reduce: production and distribution costs; consumption of fossil fuels; emission of greenhouse gases or cost of life cycle in example.*

*The proliferation of studies, and the consequent increase in knowledge, has not occurred at the same level within the naval sector. In fact, the case of warships is a field in which the existing scientific literature is scarce in quantity and in studied cases.*

*This thesis has as main objective an exhaustive analysis of the current state of the energy systems of warships and the application of mathematical procedures in this field. The work is framed within the industrial Statistical Quality Control (SQC).*

*Firstly, critical quality variables (CQV) will be identified in the vessel's energy systems, in its different modes of operation, such as anchor, cruising or port. The variables will be measured, analyzed, estimated, and predicted in value, range and time. Also, these variables will be controlled and improved by the application of data mining tools (exploratory analysis), SQC and, they will be adjusted by time series models.*

*It will be possible to estimate and calculate the existing correlations between the critical variables for the CQV's quality of these systems; to predict their values (with confidence intervals) and to define and detect alarms, trends and patterns in the data provided by the energy systems. So, it is possible to discover elements which improve the Energy Efficiency over the bases of assignable causes.*

*This will allow establishing lines of action for the modification or redesign of the systems embarked in the existing and future warships, as well as providing the bases to implement automatic and intelligent energy management systems through the automation of processes.*

# Resum

*En tots els sistemes energètics, des de la seva producció fins al consum, influeixen gran quantitat de variables dinàmiques, així definides per la seva relació de dependència respecte al temps. A causa de la gran quantitat i tipologia de variables que defineixen els sistemes energètics, es complica qualsevol actuació que tinga per objectiu, dins el camp de l'optimització i gestió de l'eficiència energètica, la seva millora.*

*Per aquesta raó, tant les organitzacions públiques com privades, promouen la obtenció i desenvolupament de nous procediments matemàtics que permetin tractar la complexitat de les variables implicades en les instal·lacions energètiques i extreure adequadament la informació que proporcionen dels sistemes energètics, de cara a aconseguir arribar realment els objectius d'eficiència energètica internacionalment acordats.*

*La majoria dels estudis que s'han realitzat des de finals del segle XX s'han centrat majoritàriament en el camp de l'enginyeria civil, on existeixen innumbrables estudis matemàtics orientats a la millora de l'eficiència energètica que, per exemple, han permès reduir els costos de producció i distribució, el consum de combustibles fòssils, l'emissió de gasos defecte hivernacle o el cost de cicle de vida.*

*Aquesta proliferació d'estudis, amb el consegüent augment del coneixement, no s'ha produït al mateix nivell dins del sector naval i molt menys en el cas dels vaixells de guerra, camp en el qual la literatura científica existent és escassa, tant en quantitat com en casos estudiats.*

*Partint d'aquesta constatació, la present tesi doctoral té com a objectiu principal l'anàlisi exhaustiva de l'estat actual dels sistemes energètics dels vaixells de guerra i l'aplicació de procediments matemàtics en aquest àmbit, emmarcats dins el control estadístic de la qualitat CEC industrial.*

*S'identificaran en primer lloc i les variables crítiques per la qualitat (CTQ) en els sistemes energètics del vaixell, en les seves diferents maneres de funcionament com són els de fondejat, navegant o en port; es mesuraran, s'analitzaran, s'estimaran, i es faran prediccions del seu valor en cada instant de temps, es controlaran i milloraran mitjançant l'aplicació d'eines de mineria de dades (anàlisi exploratòria), CEC i ajust de models de sèries de temps.*

*Amb tot això, es podran estimar i calcular les correlacions existents entre les variables crítiques per la qualitat CTQ, predir els seus valors (amb intervals de confiança), definir i detectar alarmes, tendències i patrons en les dades proporcionades pels sistemes energètics que permetin descobrir possibilitats de millora de la seva eficiència energètica a través de la recerca fonamental de causes assignables.*

*Això permetrà establir línies d'acció per a la modificació o redisseny dels sistemes embarcats en vaixells de guerra existents i futurs, així com donar les bases per implantar sistemes de gestió energètica automàtica i intel·ligents a través de l'automatització de processos.*

# Capítulo 1

## Introducción

Este capítulo tiene como finalidad presentar los elementos fundamentales inherentes a todo trabajo de investigación sea cual sea el área de conocimiento en la que se desarrolle esta. Explicaremos cual es la motivación que nos ha llevado a investigar en esta materia, caracterizaremos el problema objeto general de estudio y plantaremos con ello, la hipótesis general desde la que presentaremos los objetivos y la metodología seguida para el desarrollo de esta tesis.

Se ha estructurado en cinco capítulos, siendo el primero de ellos esta introducción que da paso al trabajo de investigación propiamente dicho formado por tres capítulos. Estos tres capítulos se encargan de desarrollar el trabajo recogiendo lo investigado para, en primer lugar, conocer el estado del arte en la materia, proceder a continuación al desarrollo del trabajo de campo y, posteriormente, analizar los resultados y validarlos. De estos capítulos se deducen las conclusiones y líneas futuras de investigación que se mostrarán en el quinto y último capítulo de esta tesis.

### 1.1. Motivación del trabajo

Desde que la humanidad comenzó a desarrollar su capacidad tecnológica ha necesitado del uso de energía. En principio usó su energía corporal empleándola para recolectar alimentos, cazar, fabricar las primeras herramientas y desplazarse. Con la utilización del fuego, el hombre pudo mejorar sus condiciones de vida. El fuego le valía para endurecer las puntas de sus lanzas de madera, cocinar la carne para ablandarla o tener un foco de calor y luz durante las noches y los periodos de frío. Desde la prehistoria hasta la actualidad la necesidad de energía se han incrementado de forma exponencial sobre todo tras la I Revolución Industrial [1].

El consumo de energía es un elemento que ayuda a conocer el estado de bienestar de las sociedades actuales y su desarrollo tecnológico además de ser un elemento fundamental en las políticas de desarrollo de las sociedades actuales [2]. Consumimos grandes cantidades de energía en todo momento: cuando conducimos un coche, cuando encendemos el ordenador, cuando nos damos una ducha, cuando hablamos o cuando estamos durmiendo.

Todos sabemos que la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Sobre esta máxima, la de su estado, se agrupará en primaria o energía disponible en el medio con capacidad de ser transformada y secundaria que son sus manifestaciones una vez se transforma así, estas transformaciones se manifiestan en forma de movimiento, calor, electricidad o reacciones químicas por poner algunos ejemplos. En el caso de

la EE nos interesa la primaria, esta condición hace que, para su caracterización, solo podamos agruparla por su procedencia en dos familias así, por un lado tenemos las energías procedentes de fuentes renovables como es la energía eólica, solar o mareomotriz y por otro, las no renovables cuyos representantes más conocidos son los hidrocarburos. Las primeras son inagotables y respetuosas con el medioambiente y, por contra, las segundas se consumen en su transformación, generan compuestos perjudiciales para el medioambiente como son los gases de efecto invernadero entre otros productos residuales. En el último caso, además de perderse el recurso energético en su transformación, sus fuentes de obtención son escasas, limitadas en cantidad y de compleja extracción en muchos de los casos [3].

En todos los sistemas energéticos influyen gran cantidad de variables dinámicas, así definidas por su relación de dependencia con respecto al tiempo por tanto, y debido a la gran cantidad y tipos de variables que definen el funcionamiento de los sistemas energéticos, cualquier actuación que busque, dentro del campo de la optimización y gestión de la EE y su mejora se complica.

Por esta razón en la actualidad y tras las evidencias existentes del cambio climático y la necesidad de obtener sistemas eficientes y sostenibles desde el punto de vista energético, tanto las organizaciones públicas como privadas promueven desde hace algunos años la investigación para la obtención y desarrollo de nuevos procedimientos matemáticos que permitan tratar la complejidad de las variables implicadas en las instalaciones energéticas y extraer adecuadamente la información que proporcionan de los sistemas energéticos de sus variables, de cara a lograr alcanzar realmente los objetivos de EE internacionalmente acordados en tratados como el protocolo de Kyoto de 1998 [4].

La mayoría de los estudios que se han realizado desde finales del siglo XX se han centrado en su mayoría en el campo de la ingeniería civil, donde existen innumerables estudios matemáticos orientados a la mejora de la EE que, por ejemplo, han permitido reducir los costes de producción y distribución, el consumo de combustibles fósiles, la emisión de gases de efecto invernadero o el coste de ciclo de vida [5]. Esta proliferación de estudios, con el consiguiente aumento del conocimiento, no se ha producido al mismo nivel dentro del sector naval, y mucho menos en el caso de los buques de guerra, campo en el que la literatura científica existente es escasa, tanto en cantidad como en casos estudiados. Esta situación es la que nos ha llevado a considerar el desarrollo de esta tesis doctoral.

## 1.2. Caracterización del problema

Los buques de guerra objeto de análisis en esta tesis son los denominados genéricamente buques de escolta que se agrupan en dos tipos o familias: fragatas y destructores. Este tipo de buques constituyen la columna vertebral de las marinas de todo el mundo. Como ejemplo de estos tenemos las fragatas clase F-100 “Álvaro de Bazán” españolas, las fragatas noruegas de la clase “Fridtjof Nansen” o los destructores australianos de la clase “Hobart”. Todos estos buques han sido diseñados completamente y construidos en su totalidad o en parte en España.

De forma general cualquier buque de guerra requiere de ingentes cantidades de energía necesaria para moverse y para hacer funcionar el gran número de sistemas eléctricos y electrónicos que embarcan. Si tomamos como ejemplo una fragata de la clase F-100, encontramos instalados consumidores que suman un total de 1.600

elementos totalizando 9 MW .

Evidentemente no todos estos consumidores funcionan a un mismo tiempo y, dependiendo de las características de la misión que se les encomiende, del tiempo necesario para ejecutarla y la climatología , el buque consumirá más o menos energía.

En el caso de los buques de guerra podemos asumir de forma general que, el tiempo de funcionamiento se reparte entre periodos en el mar y periodos en puerto. El primero de los periodos incluirá las condiciones de operación, navegación o emergencia y, el segundo de ellos incluirá los periodos en puerto apagado y en puerto encendido o fondeado.

De todo lo anterior podemos deducir lo complejo del estudio ya que, a diferencia de una instalación terrestre donde se pueden predecir de forma aproximada elementos estacionales como el horario de trabajo o la climatología local, en el caso de los buques de guerra se pueden presentar escenarios muy distintos a nivel climático y de modos de operación o funcionamiento dada la movilidad inherente de estos y, por tanto, hace que entren en juego múltiples variables que complican el estudio energético del buque en términos de EE y hace que nos preguntemos sobre como afectan estas variables y cual es su peso en el funcionamiento de los equipos embarcados y las relaciones que existen entre estas y el consumo final para poder actuar de forma correcta en la gestión energética del buque reduciendo su consumo y mejorando su EE.

### **1.3. Hipótesis y objetivos**

Podemos plantearnos la hipótesis en la que, desde el análisis y control estadístico de la calidad, nos permitan conocer y comparar las variables críticas relacionadas con los sistemas embarcados que muestren cuales son los modelos matemáticos de consumo energético para así, poder cuantificar las características principales de las variables implicadas de forma directa e inequívoca en el aprovechamiento energético del caso de estudio. De esta forma estableceremos los siguientes objetivos de este plan de tesis:

1. Conocer el estado del arte en materia de EE en el sector naval, localizando, estudiando y analizando la bibliografía existente en esta materia, además de identificar y comprobar cuáles son los elementos más novedosos en el ámbito estudiado.
2. Aplicación, ajuste y modificación de modelos de análisis y control estadístico básicos que nos permitan el estudio de las variables del caso seleccionado, determinando las variables críticas para su calidad, realizando la toma de datos para la elaboración de Series Temporales de Datos (STD) y ejecutando simulaciones con las mismas que permitan contrastar su idoneidad.
3. Integración de las STD que posibiliten la caracterización de datos determinantes en la eficiencia del caso para la toma de datos reales de forma sistemática.
4. Diseño y construcción de herramientas informáticas que permitan desarrollar interfaces gráficas que faciliten el estudio y análisis de las STD para poder estimar los niveles de EE y las posibilidades de mejora.

5. Delimitación de los resultados y conclusiones del trabajo que sirvan para redactar la tesis final donde se mostrarán resultados, conclusiones finales y propuestas que abran futuras líneas de investigación en materia de EE en buques de guerra.

### 1.4. Metodología

Conocido el estado del arte en la materia, apoyaremos nuestro estudio en la modelización de las variables críticas para la calidad de los sistemas instalados en buques de guerra desde el punto de vista estadístico. Para ello se tomarán datos reales correspondientes a las distintas Situación de Carga Eléctrica (SCE) y modos de operación del buque correspondientes a estas variables críticas relacionadas con los sistemas embarcados. Estas serán variables dependientes dentro de las categorías de una o más variables independientes y conformarán la Base de Datos (BD) sobre la que realizaremos la MD necesaria para realizar el análisis.

Se emplearán en el estudio las STD junto a técnicas estadísticas que permitan estimar y correlacionar los consumos energéticos del buque con estas y, de igual forma, se efectuarán análisis de su idoneidad permitiendo la estimación de la estructura de dependencia y de los valores de la variable respuesta con el menor error posible.

El problema de análisis y control de la calidad de la EE en buques de guerra puede abordarse como un problema multivariante puesto que la calidad de sus sistemas dependen, la mayoría de las veces, de varias variables en correlación. Por tanto, para definir las relaciones de dependencia, será útil el uso de gráficos de control como pueden ser, entre otros, los tipo Shewhart de rangos ( $\bar{X}$ ) y medias ( $\bar{X}$ ) que permiten detectar cambios grandes o sus variedades multivariante, los gráficos Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) o Multivariative Exponentially Weighted Moving Average (MEWMA), Cumulative Sum (CUSUM) o Multivariative Cumulative Sum (MCUSUM), eficientes en la detección de cambios pequeños, para controlar la posición y variabilidad.

Cuando se trabaja con un gran número de observaciones de alta dimensión, definidas por un alto número de variables, el problema se complica, es por ello por lo que, para facilitar la tarea de control multivariante en buques de guerra, se pueden considerar métodos de selección de variables combinadas con la aplicación de gráficos de control, que servirán para detectar los cambios de procesos en una variedad de escenarios prácticos como es el presente caso.

Además, podrán ser de aplicación los gráficos de control para datos autocorrelacionados, a los residuos resultantes del ajuste de series de tiempo, permitiendo la identificación rápida de los cambios del proceso estudiado. También se ha procedido a la elaboración de simulaciones numéricas que nos permitan conocer el comportamiento de las variables estudiadas como puede ser la temperatura del agua de mar, la temperatura ambiente o del propio sistema estudiado. La creación de esta tesis ha seguido los pasos iniciales que se pueden ver en la figura 1.1 en la que se ven los elementos considerados en la gestación de esta investigación que han permitido elaborar la metodología, el estudio, su análisis y las conclusiones que dan contestación a las preguntas de la hipótesis y que han permitido escribir los documentos de esta tesis.

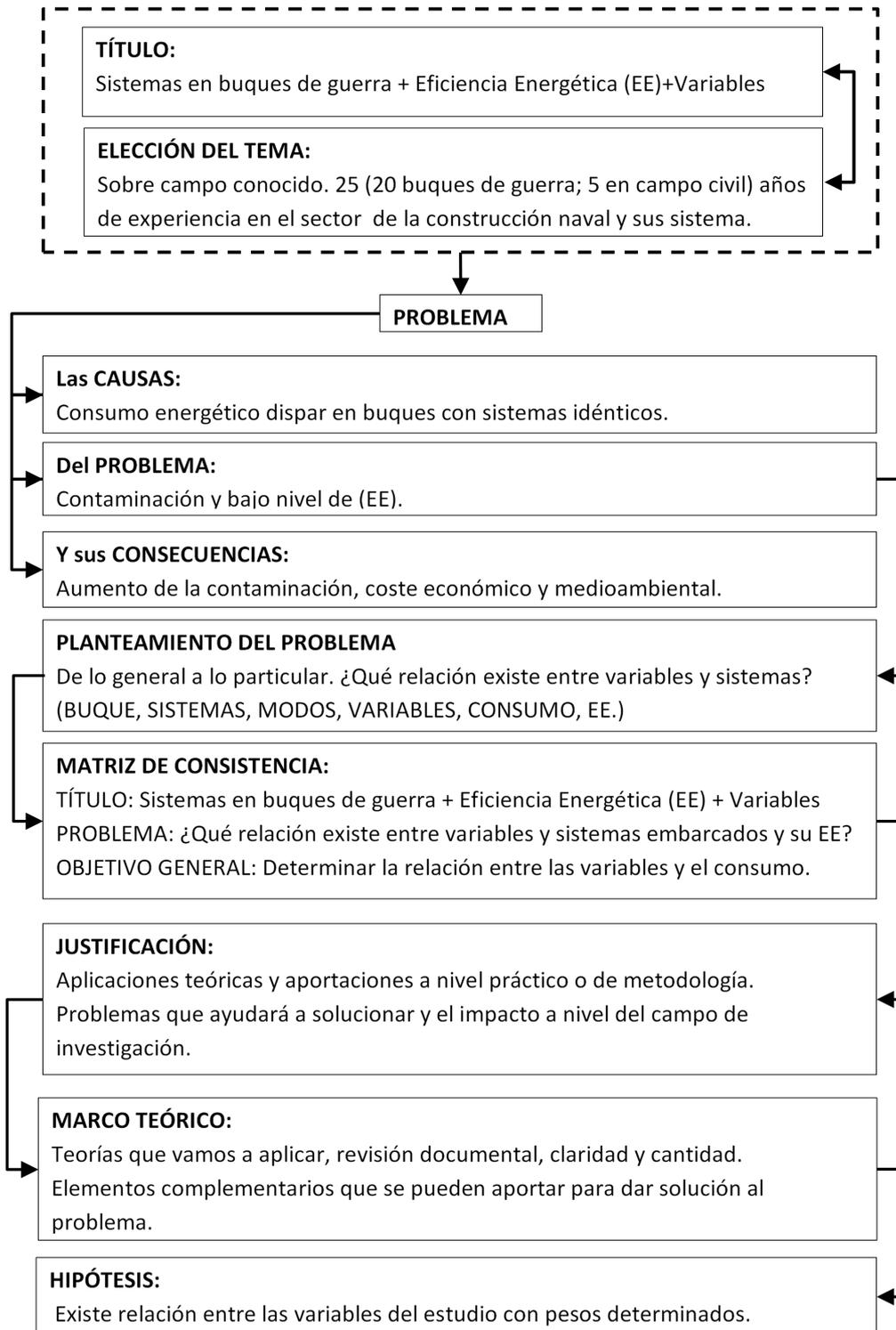


Figura 1.1: Pasos iniciales de la tesis. Elaboración propia (2016)

# Capítulo 2

## Estado del arte

En este capítulo se presentan los elementos necesarios para poder establecer los cimientos de la tesis. Por ello, empezaremos por definir qué es un buque de guerra y qué es EE pues son fundamentales para poder abordar el estudio. Se hace también un repaso de elementos tanto normativos como tecnológicos que se vienen utilizando en la mejora de la EE tanto, en buques en general como aquellas particulares aplicadas a buques de guerra y, como es evidente, analizaremos el caso particular de la Armada Española y los pasos que están dando en este campo. Completaremos este capítulo con un repaso de las herramientas matemáticas que se están empleando hoy en día en materia de EE en el campo naval e industrial. El capítulo termina con una serie de conclusiones que servirán como elemento de orientación en los capítulos siguientes.

### 2.1. Definición de buque de guerra y EE

Es verdad que en la actualidad la complejidad de los buques de guerra hace que deban ser considerados como sistema de sistemas [6]. Esto se hace más evidente si atendemos a la cantidad de interacciones y conexiones que se dan entre los distintos sistemas y equipos embarcados en los buques modernos [7]. De todas formas, la definición que daremos a continuación es la más tradicional que considera el buque de forma separada en dos elementos. Lo hacemos para dar una visión más gráfica del mismo y para simplificar esta definición debiendo tener presente lo expresado anteriormente. Así pues, los buques de guerra, desde los más grandes como los portaaviones a los más pequeños como los patrulleros, pasando por los submarinos y los buques auxiliares o los logísticos y de aprovisionamiento, están compuestos por dos elementos fundamentales [8] según la definición tradicional que son:

1. **La plataforma:** compuesta por la estructura sobre la que se instalan el resto de equipos y servicios de buque tanto principales como el servicio de propulsión, los generadores o los equipos auxiliares; todos los sistemas se integran con un Sistema Integrado de Control de plataforma (SICP) encargado de automatizar y controlar la mayoría de los procesos que se desarrollan en el buque de guerra. En la plataforma es también donde desarrollan su trabajo las personas que forman lo que denominaremos dotación.
2. **El Sistema de Combate (SC):** es la carga útil o, si queremos emplear el término inglés, es el “payload” del buque de guerra y para el que trabajan el resto

de sistemas embarcados. Al igual que el SICP con la plataforma, el SC tiene como misión fundamental integrar en uno todos los sistemas y subsistemas de armas para facilitar la capacidad de repuesta del buque ante las amenazas para las que está diseñado.

En la figura 2.1 podemos ver un croquis de un buque de guerra tipo escolta. En esta figura vemos la plataforma y algunos de los elementos pertenecientes al SC como son los sistemas de lanzamiento de misiles HARPOON y Vertical Launching System (VLS), los cañones MK-38 ó MK-45 o las antenas de los sensores instalados en las superestructuras y palos. Todos estos elementos que vemos en el exterior tienen su prolongación en el interior del buque hasta los sistemas de integración de señales de los mismos.

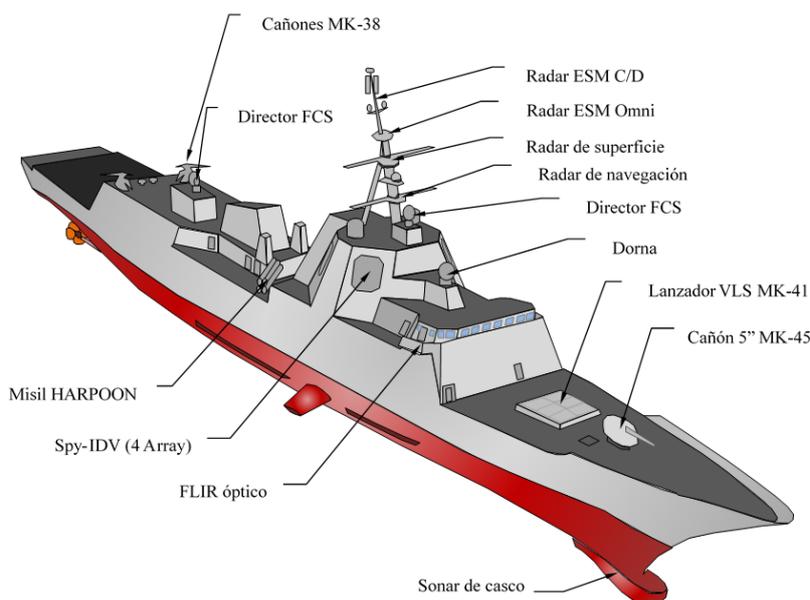


Figura 2.1: Esquema de un buque de escolta. Elaboración propia (2016)

Como hemos dicho, el SC es la carga útil así en la figura 2.2 podemos ver como se reparten de forma general los espacios interiores de la plataforma para facilitar la segregación de los equipos destinados a cada una de las funciones que queremos que desarrolle nuestro buque. La plataforma se compartimenta en base a cubiertas en sentido horizontal y mamparos en sentido transversal y sus refuerzos, esta conjugación de elementos configura una topología estructural que está destinada a soportar los esfuerzos producidos por las condiciones de la mar, el viento y las propias del funcionamiento de los equipos que transmiten pulsos a sus elementos de apoyo denominados polines en el campo naval. Los espacios los podemos dividir de forma general en:

1. **Tanques:** son espacios de almacenamiento de consumibles como el combustible empleado para la propulsión o la generación eléctrica; otros tanques almacenan agua potable, aceite de lubricación o residuos sin tratar. Generalmente se sitúan en la parte más baja del buque entre la quilla y una cubierta que se denomina de doble fondo y que podemos ver representado en la figura 2.2.

2. **Espacios de máquinas:** en este grupo encuadramos los espacios dedicados a la propulsión a la generación y los destinados a los equipos auxiliares del buque como los destinados a la calefacción ventilación y acondicionamiento de aire (Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC)), bombas de contra incendios, depuradoras o compresores.
3. **Espacios de equipos electrónicos:** Los dedicados a albergar los equipos de comunicaciones como la radio o los sistemas de mando y control del buque.
4. **Espacios destinados a las armas:** estos son los pañoles de munición, o los de lanzadores de misiles donde se mantienen unas condiciones de control y seguridad extremas para evitar accidentes.
5. **Espacios de maniobra y control:** aquellos destinados a los equipos de maniobra de amarre, fondeo o gobierno del buque.
6. **Espacios de habitabilidad:** se reparten entre espacios de habitabilidad para las dotaciones como los camarotes, cocinas, comedores, espacios de descanso y esparcimiento, oficinas, cámaras frigoríficas para alimentos o enfermería.

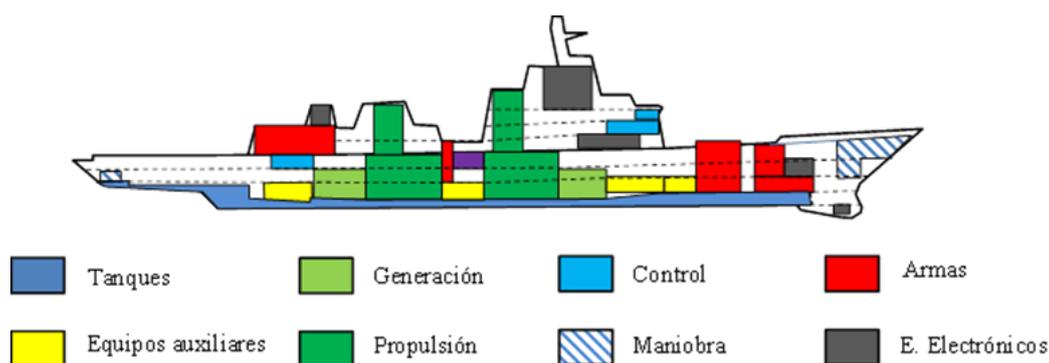


Figura 2.2: Distribución esquemática de espacios. Elaboración propia (2016)

El otro elemento importante de esta tesis es la EE. Todos sabemos que la energía es fundamental para las sociedades actuales. Son diversas las formas en las que se presenta la energía, desde la gravitatoria, pasando por la cinética, elástica, sonora, lumínica y eléctrica hasta la térmica, química o nuclear; todas sus formas de transformación son aprovechadas por el hombre en su actividad.

La forma en la que empleamos esta energía puede ser más o menos eficiente dependiendo de la prudencia con la que hayamos desarrollado los diseños de los sistemas energéticos y así, la segunda definición que daremos en este apartado es la de EE que, de forma muy sencilla, podemos decir que EE es hacer más con menos. De todas formas, existen multitud de definiciones de EE haciendo hincapié en los mismos elementos: reducción del consumo sin penalizar la eficacia. Nosotros vamos a tomar la definición siguiente aplicable a cualquier campo de actividad que requiera de energía y diremos que:

*La Eficiencia Energética consiste en la reducción de consumo de energía, manteniendo los mismos servicios energéticos, sin disminuir el confort ni la cali-*

*dad de vida, asegurando el abastecimiento de energía, protegiendo el medio ambiente y fomentando la sostenibilidad [9]*

No debemos confundir ahorro con eficiencia, esto es muy importante. Si bien los sistemas eficientes buscan el ahorro, buscar el ahorro puede no ser eficiente puesto que podemos estar afectando a la cadena productiva o a la simple actividad de la organización y por tanto, el ahorro, debe entenderse dentro de parámetros de EE que permitan mantener la actividad propia sin merma en la misma de la eficacia.

## 2.2. Evolución histórica del buque de guerra

Existen registros arqueológicos de la época prehistórica desde hace 60.000 años según algunas fuentes [10] [11] e históricos sobre embarcaciones empleadas para el comercio y el transporte desde época antigua en Mesopotamia y Egipto [12]. Si bien romanos y griegos diferenciaban los tipos de embarcaciones para el combate [13] y el comercio, las tecnologías aplicadas en su construcción eran las mismas y no variaban prácticamente. En general, en los albores de la navegación marítima las embarcaciones tanto valían para el transporte de personas y mercancías como para la guerra, y así fue durante muchos siglos hasta la aparición de las marinas de guerra permanentes al final del siglo XVII y principio del XVIII. Esta aparición viene impulsada por los avances tecnológicos y las necesidades de los reinos europeos de reducir los tiempos necesarios para desplazarse a las colonias americanas, ya que no solo se trata de comerciar pues se hace imperioso defender la integridad territorial [14]. Desde la aparición de las marinas permanentes, en las que los buques de guerra se diferenciaron de los mercantes definitivamente, estas adoptan estructura y misiones definidas, dependen de los estados y usan buques pensados solo para la guerra y serán las marinas precursoras de las actuales.

Con el tiempo estas marinas se especializan y crean buques de distinto tipo para llevar a cabo misiones bien diferenciadas así, aparecen los navíos, las fragatas, las corbetas o los avisos diferenciándose en principio, en su desplazamiento y número de cañones embarcados [15]. Los distintos tipos de buques y su clasificación fueron sufriendo variaciones con la aplicación de innovaciones tecnológicas como la construcción en acero, el blindaje, la evolución en el diseño de las velas, la introducción de la máquina de vapor y la propulsión mecánica y otros avances tecnológicos.

No será hasta finales del siglo XIX, cuando los buques de guerra abandonen definitivamente el uso de las velas y los remos para su propulsión. Velas y remos fueron los sistemas empleados para moverse durante muchos siglos. Los barcos de vela veían afectada su movilidad y velocidad por la velocidad, intensidad y dirección del viento, en principio no era necesario preocuparse de su agotamiento pero hacía que los barcos dependiesen de factores externos que perjudicaban a su eficacia.

Con la incorporación de la máquina de vapor en los buques a principio del siglo XIX aparecen los primeros vapores también llamados piróscafos. Los buques de guerra adoptarán su uso por la eficacia de las mismas al mejorar la capacidad de maniobrar con respecto a los de vela y no hacerlos depender de factores externos. La propulsión mecánica les daba la ventaja táctica y suponía, en caso de combatir, no depender de las corrientes y vientos como sucedía con los buques de guerra propulsados a vela pero, por el contrario, surgen aquí otras necesidades y problemas como las del agotamiento de la fuente de energía necesaria para alimentar la maquinaria de pro-

pulsión que obligaba también a dedicar grandes espacios para alojar la maquinaria y el combustible necesario para moverse, limitando así el resto de espacios como por ejemplo los dedicados al almacenamiento de municiones, cañones o los dedicados a alojar las numerosas dotaciones de estos barcos. Con la aplicación de la propulsión mecánica podemos decir que se pasa de los sistemas de propulsión basados en energía renovables y sostenible a sistemas de propulsión basados en energías no renovables y de recurso limitado y agotable.

Con el paso del tiempo los buques de guerra fueron mejorando sus capacidades a medida que aparecían nuevas tecnologías y así, con la mejora de los procesos de obtención de aceros más resistentes como son los convertidores Bessemer (1855), los hornos de reverbero Martin-Siemens (1865) o los hornos eléctricos de arco (1898) [16], permitieron construir buques de acero más grandes y mejores para la navegación, con mayor capacidad de carga o más espacio para sus armas. Los buques de guerra siempre han sido los primeros en adoptar innovaciones tecnológicas que tardan muchos años en ser adoptadas a los buques civiles tales como fue la electricidad para alumbrado o la telegrafía sin hilos. Esta última fue utilizada por primera vez en la guerra ruso japonesa en 1904 donde demostró la importancia de las comunicaciones a larga distancia en táctica naval obligando así, a la inmediata instalación de estos sistemas en todos los buques de guerra del mundo.

El final de la II Guerra Mundial marcó el comienzo de una nueva era para los buques de guerra, a partir de este momento la aplicación de la regulación y automatización electrónica a todos los sistemas se convierte en algo fundamental. Unido al uso de armas con un alto componente tecnológico como los misiles, la aplicación de la energía nuclear y el establecimiento de la aviación naval con los portaaviones como buques líderes de las fuerzas y determinantes de su poderío, van a marcar la evolución de las flotas modernas en la segunda mitad del siglo XX.

Este desarrollo tecnológico desde el punto de vista energético, hace necesaria la utilización de ingentes cantidades de energía tanto para la obtención de los materiales necesarios para su construcción como para su uso y el de todos los sistemas que llevan embarcados y, nos hacen depender de fuentes energéticas de las que en ocasiones no se dispone directamente [17], [18]. Es necesaria energía para su propulsión, energía para alimentar los sistemas de comunicaciones, energía para los sistemas auxiliares, para las armas, los radares etc.

En la segunda mitad del siglo XX, la gran cantidad de sistemas diferentes embarcados y la mejora de la eficacia de las armas existentes, hicieron surgir la necesidad de encontrar poder integrar todos estos sistemas en uno solo que permita la toma de decisiones rápidas y acertadas. Esto se ha conseguido con la ayuda del desarrollo informático alcanzado hasta el momento. Con el empleo de sistemas integrados los buques de guerra tendrán la ventaja ante los que no lo lleven. La integración de todos los elementos en un único sistema de control permitirá reaccionar de forma más rápida ante las amenazas que se puedan presentar. La figura 2.3 muestra de forma esquemática como han ido evolucionando y especializándose los buques de guerra a lo largo de la historia. Desde el simple tronco a los buques de guerra modernos han pasado muchos siglos que, dependiendo de los avances tecnológicos del momento y de la situación social, política y económica han propiciado los cambios en las plataformas y los sistemas embarcados a lo largo de la historia.

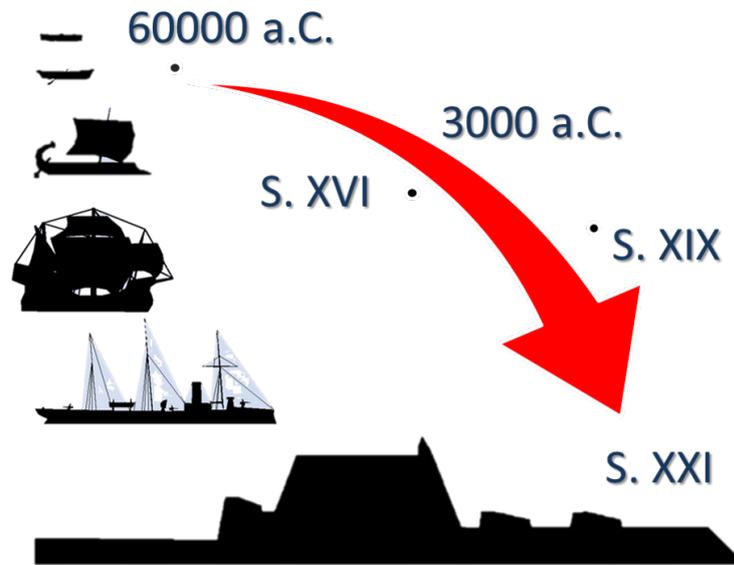


Figura 2.3: Evolución de los buques de guerra. Elaboración propia (2017)

### 2.2.1. Clasificación de los buques de guerra

Plataforma y SC son los dos elementos diferenciadores de cualquier buque de guerra así, dependiendo de las funciones que tenga nuestro buque tendremos distintos tipos de plataformas y distintos sistemas de combate que permitan funcionar al buque de guerra de la forma más eficaz posible. Como ya hemos dicho antes, es durante el siglo XVIII, cuando queda claramente separada las características de los buques de guerra y de los mercantes. La clasificación de los buques de guerra en estos momentos de la historia se basaba:

- **El número de cubiertas** de 1 a 3 por lo general.
- **El número de piezas de artillería** oscilando entre 20 y 100 ó más.

Con estos dos elementos sencillos uno relacionado con la plataforma y otro con sus armas se clasificaban los buques en:

- **Navíos:** eran buques con 3 cubiertas o puentes y con un número de cañones del orden de 100 ó más eran los mayores y más pesados de las flotas y su misión fundamental era el combate contra las flotas militares enemigas. El navío o navío de línea se le denominaba así porque combatían alineados uno detrás de otro. Esta táctica fue la empleada durante los siglos XVII al XIX. El mayor de los exponentes de este tipo de buques fue el “Santísima Trinidad” de la Armada, que tras dos ampliaciones alcanzó un número de 4 puentes o cubiertas y un total de 136 piezas de artillería [19].
- **Fragatas:** hasta 2 cubiertas y con un número de piezas de artillería de entre 30 a 50 cañones; eran más ligeras y veloces que los primeros. Se encargaban de apoyar en el combate a los navíos, perseguían el tráfico marítimo del enemigo y escoltaban al tráfico mercante propio en las navegaciones oceánicas.

- **Corbetas:** con 1 cubierta y con artillería entre 25 y 30 cañones. Se empleaban en funciones de escolta de buques mercantes, control de costas y funciones de control de flotas.
- **Avisos:** al igual que las corbetas con 1 cubierta y 15 a 20 cañones. Estos se empleaban en funciones de comunicación entre flotas eran los más veloces de todos los barcos.
- **Otros:** existían otros tipos de buques de menor porte como urcas, jabeques, balandras, bergantines o bombardas que se empleaban en funciones de comunicación e inteligencia llevando despachos e información de unos buques a otros y desde estos a tierra o desde tierra a los buques. Cerca de costa o en aguas interiores combatían piratería, contrabando y otro tipo de actividades ilícitas.

Todos ellos eran buques propulsados a vela, el remo quedaba relegado a botes auxiliares o para embarcaciones mixtas empleadas en labores de pesca o comercio en aguas interiores. Tras la introducción de la máquina de vapor en los buques con la propulsión mecánica, los buques de guerra cambiaron su configuración y funcionalidades apareciendo nuevos tipos de buques y desapareciendo otros. Hoy en día los buques de guerra se pueden clasificar de múltiples formas. La primera clasificación que podemos hacer y la más sencilla, es aquella que distingue los buques de guerra en dos grandes grupos, aquellos que desarrollan su actividad sobre la superficie del mar (unidades de superficie) o aquellas que lo hacen desde las profundidades de estos, (unidades submarinas).

Otra forma puede ser en base a su propulsión, pero esto diría poco sobre sus características bélicas. Por último podemos establecer una clasificación más acertada en base a su desplazamiento y funciones, así tenemos los siguientes tipos de buques:

- **Portaaviones:** los mayores buques de las flotas por lo general, donde podemos distinguir tres tipos:
  - Portaaviones de ataque: de 60.000 Toneladas (Tn) como la clase “Nimitz” mejorada cuyo último representante es el “Ronald Reagan” y embarcan del orden de 100 aeronaves de distintos tipos.
  - Portaviones medios: 30.000 a 60.000 Tn y llevan ya aviones con despegue en carrera ejemplo el “Charles de Gaulle” francés o los modernos portaaviones británicos “Queen Elizabeth” transportando del orden de 40 aparatos.
  - Portaviones ligeros: desde 18.000 a 30.000 Tn. Usan aviones de despegue corto y vertical como Harrier o F-35 JFS y helicópteros, ejemplo de este es el “Príncipe de Asturias” de la Armada Española ya desaparecido o el tailandés “Chakry Naruebet” con 15 a 20 aparatos embarcados.
- **Acorazados:** de 15.000 Tn en adelante y que llegaron a desplazar las 68.000 Tn del “Yamato” y “Musashi” de la armada imperial del Japón durante la II Guerra Mundial, o las 57.000 Tn de los clase “Iowa” de EEUU de los cuales el último representante fue el “New Jersey” que causó baja en 1992. En la actualidad no existen acorazados en servicio.

- **Cruceros:** de 7.000 a 15.000 Tn como los de la armada de los Estados Unidos de la clase “Ticonderoga” de 9.754 Tn.
- **Destruyores:** de 4.500 Tn a 7.000 Tn por ejemplo, los destructores de la “Clase 45” británicos de última generación que desplazan alrededor de 7.400 Tn.
- **Fragatas:** de 1.500 a 4.500 Tn. Son fragata las F-100 si bien su desplazamiento es mayor y por ejemplo en otras armadas se clasificarían como destructores.
- **Corbetas:** de 700-800Tn hasta 1.500 Tn.
- **Patrulleros:** tenemos pesados desde 400 Tn a 1.200, medios (de 150 a 40 Tn) y ligeros (menos de 150 Tn).
- **Submarinos:** que se agrupan en dos familias:
  - Submarinos convencionales: entre las 1.200 y 3.000 Tn de desplazamiento en inmersión, en función de su radio de acción se clasifican en corto, medio o largo alcance que se corresponde con su tonelaje así, cuanto más alto implica más radio acción.
  - Submarinos nucleares: con misiles balísticos SSGN o de ataque SSN y su desplazamiento varía entre las 2.300 Tn de la clase “Skate” (EE.UU.) y las 30.000 de la clase “Typhoon” (antigua Unión Soviética). La mayoría son submarinos de ataque o lanzamisiles, de alta velocidad (más de 30 nudos en inmersión), y de autonomía prácticamente infinita.
- **Buques auxiliares:** en este grupo están todos los buques que no se emplean en acciones de guerra de forma directa y que son buques de apoyo a los anteriores tales como los buques aprovisionamiento encargados de acercar los consumibles a los teatros de operaciones, los buques encargados de las labores de inteligencia, los buques escuela o los remolcadores y petroleros de transporte.

La figura 2.4 compara el tamaño de los principales tipos de buques. El primero es el perfil de un portaaviones de ataque, el “Queen Elizabeth” de la Royal Navy que marca la frontera de este tipo de buques con 70.800 Tn de desplazamiento, después está el destructor de la marina de los EE.UU. “Zumwalt” de 14.800 Tn, le sigue la fragata “Cristóbal Colón” de la Armada Española con 6.000 Tn, seguida de una corbeta china de la clase “Jingdao” con 1.500 Tn y un patrullero de 1.000 Tn de la clase “Serviola” español. Por último los submarinos convencionales de propulsión diésel eléctrica y un submarino nuclear. Se puede apreciar la gran diferencia de tamaño que existen entre estos dos tipos de sumergibles.

### 2.2.2. Los sistemas de generación de energía embarcados

En los buques de guerra debemos distinguir entre dos tipos de energía, la energía empleada en la propulsión del buque para desplazarlo de un punto a otro y la energía que se emplea para hacer funcionar el resto de sistemas y equipos como puede ser el alumbrado, las armas, los sistemas electrónicos como los radares o el sistema de climatización del buque. Esto hace que, dependiendo de las características del buque, se opte por un sistema determinado para generar la energía mecánica

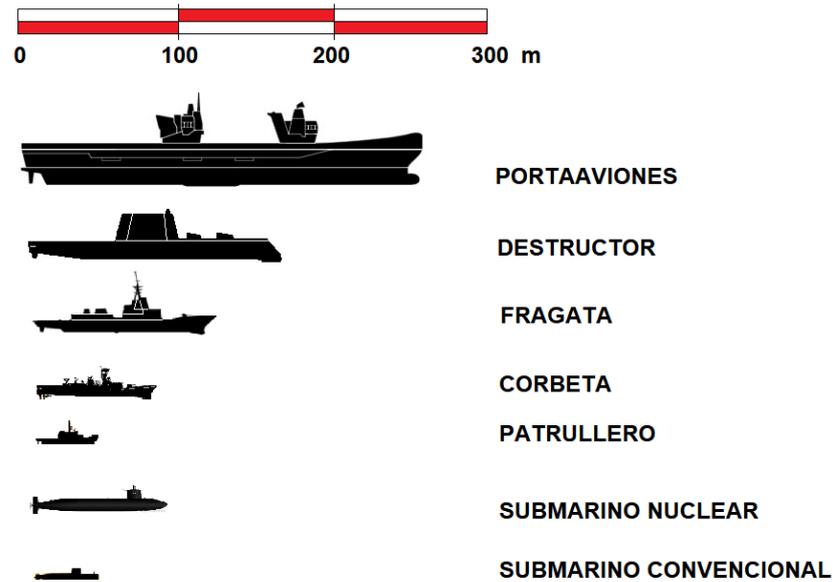


Figura 2.4: Comparación de tipos de buques. Elaboración propia (2017)

necesaria para moverse y otro para generar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del resto de sistemas embarcados.

Actualmente existen variadas combinaciones de sistemas aplicados a buques de guerra destinados a su propulsión entre los que los más usados están [20] [21]:

1. **Motores diésel** que queman combustibles fósiles. Es una planta típica de buques auxiliares como puede ser desde un remolcador a un buque de aprovisionamiento. Generalmente llevarán propulsión y generación en base a motores diésel.
2. **Turbinas de gas** que queman combustibles más ligeros como el JP5. Esta es la propulsión típica de buques de escolta o portaaviones ligeros como era el “Príncipe de Asturias” de la Armada.
3. **Turbinas de vapor** que emplean el vapor generado en calderas que queman combustibles fósiles o emplean reactores nucleares. Estas plantas fueron muy empleadas hasta los años setenta. En la Armada el último de los ejemplos de estos buques fueron las fragatas de la clase “Balears” construidas a finales de los sesenta y primeros años setenta. El empleo de reactores nucleares es el típico de los portaaviones de ataque como los de la clase “Nimitz” de los EE.UU. o el “Charles de Gaulle” francés. Los submarinos nucleares son los otros representantes de la propulsión naval nuclear.
4. **Motores eléctricos** que emplean la energía generada por motores diésel o turbinas de gas. En ocasiones se recurre a buques completamente eléctricos empleándose para su propulsión motores eléctricos como puede ser el caso del

“Juan Carlos I” de la Armada o sus gemelos de la Real Marina Australiana (RAN).

5. **Plantas combinadas e híbridas** como pueden ser las resultantes de combinar motores diésel con turbinas de gas, motores diésel y eléctricos o turbinas de vapor y gas entre otras.

En el caso de las fragatas F-100 españolas, las noruegas de la clase “Fridjot Nansen” o los destructores australianos de la clase “Hobart” se emplean plantas combinadas denominadas tipo CODOG del inglés “COmbined Diesel Or Gas”, es decir, que para la propulsión emplean turbinas de gas o motores diésel dependiendo de la situación de operación del buque así, cuando el buque necesita ser más rápido y tener una capacidad de respuesta de maniobra mayor, necesitará emplear sus turbinas de gas por contra, cuando se encuentra en situaciones menos demandantes como puede ser un tránsito de un puerto a otro en el que no se realizan ejercicios empleará un modo más económico con los motores diésel.

La generación eléctrica para el resto de sistemas se consigue empleando también combinación de elementos como los anteriores así, en buques completamente a vapor se suelen emplear los denominado turbo generadores, en buques de turbinas de gas se pueden emplear turbos o motores diésel los buques híbridos pueden emplear cualquiera de los sistemas anteriores para general electricidad que se empleará tanto para alimentar equipos eléctricos y electrónicos como para propulsar el buque de forma más económica. En resumen, la generación dependerá en cierta medida de la planta de propulsión elegida para nuestro buque.

Estableceremos la siguiente relación entre tipos de buques y sus plantas de propulsión y generación eléctrica como se puede ver en el cuadro 2.1 donde vemos el tipo de buque, una clase de ejemplo su desplazamiento en Tn nombrado con el operador  $\Delta$  el tipo de propulsión, la potencia y el tipo de generación. En la primera columna de tipo aparecen las letras C, N, L y A que hacen referencia respectivamente a Convencional, Nuclear, Ligero y Ataque. En la columna de Tipo de planta se presentan grupos de dos letras separados por guiones de la forma (XX – XX – XX) creados a tal efecto así, el primer grupo se refiere al tipo de propulsión del buque, el segundo al tipo de generación eléctrica para alimentar el resto de equipos y el tercero es el tipo de planta que transforma la energía potencial del combustible. EL significado de los acrónimos dependiendo del grupo es:

- **Propulsión:** turbina de vapor (TV); turbina de gas (TG); diésel propulsor (DP) y propulsor eléctrico (EL)
- **Generación:** generador turbo de vapor (GT); diésel generador (DG); baterías (BT) y turbina de gas (TG)
- **Suministradores de energía:** caldera de vapor (CV) y reactor nuclear (RN)

Cuando aparece una barra significa que existen diferentes alternativas de planta combinada como el caso TG/DP que significa turbina de gas o diésel propulsor. Esta nomenclatura se ha creado para emplearla en esta tabla para y reflejar no solo la propulsión sino también el carácter de la generación auxiliar necesaria para el resto de sistemas embarcados.

Existe para las plantas combinadas de propulsión una nomenclatura aceptada a nivel internacional basada en las siguientes pautas:

- Se emplean las letras CO para referirse al carácter combinado de la planta y vienen del inglés “Combined”.
- Se emplea la letra D para referirse a un propulsor Diésel, La letra G a una turbina de Gas, la N a un reactor Nuclear, la S para el vapor y la letra E para motores eléctricos todas ellas de las palabras inglesas “Diesel”, “Gas”, “Nuclear”, “Steam” y “Electric”.
- Para referirse a la forma de combinación es decir, como trabajan las máquinas consideradas para nuestro buque se emplea la letra A del inglés “And” y la letra O del inglés “Or” así, la primera se pondrá cuando los sistemas puedan funcionar al mismo tiempo y la segunda, cuando uno sea alternativo al otro y no funcionen a un tiempo.

Como ejemplos de plantas tenemos las COMbined Diesel And Gas (CODAG), COMbined Diesel Or Gas (CODOG), COMbined Gas And Gas (COGAG), COombined Gas Or Gas (COGOG), COMbined Nuclear And Gas (CONAG) , COMbined Gas And Steam (COGAS), COMbined Electric Or Gas (COEOG), COMbined Electric Or Diesel (COEOD), COMbined Electric Or Steam (COEOS), COMbined Gas Electric Steam (COGES) y COEA-X. Este último tienen como referente el sistema “Diesel Electric Booster Drive” (DEBD) que combina propulsores diésel y motores eléctricos empleado en buques portacontenedores con gran demanda de energía superiores a los 65.000 Kilovatio (kW). Sea cual sea el sistema de propulsión y generación eléc-

tipo	Clase	$\Delta Tn$	Planta	Potencia (kW)
Acorazado	Yamato (Japón)	72.800	TV-GT-CV	110.000
Crucero	Kirov (Rusia)	25.000	TV-GT-RN	111.800
Destructor	Zumwalt (EE.UU.)	14.600	TG-DG	78.000
Fragata	F-100 (España)	6.000	TG/DP-DG	9.000
Corbeta	Jiangdao (China)	1.300	DP-DG	5.148
Patrullero	L'Androit (Francia)	1.450	DP-DG	5.600
Anfibios	Canberra (Australia)	27.850	EL-DG/TG	27.600
Submarino C	T-212 (Alemania)	1.830	DP/EL-DG/BT	1.700
Submarino N	Los Angeles (EE.UU.)	6.900	EL-GE-RN	35.000
Portaaviones L	Garibaldi (Italia)	13.850	EL-TG	61.100
Portaaviones A	Queen Elizabeth (R.U.)	70.600	EL-TG/DG	56.000

Cuadro 2.1: Comparativas de buques: tipo y propulsión. Elaboración propia (2018)

trica escogido para el buque de guerra, es necesario dimensionar los motores para conocer la potencia necesaria tanto para mover el buque a la velocidad deseada, como para alimentar los distintos consumidores eléctricos y electrónicos instalados a bordo.

En la figura 2.5 podemos ver distintos tipos de combinaciones de plantas instaladas en buques de guerra, en la actualidad están teniendo gran aceptación las plantas completamente eléctricas integradas o combinadas con motores diésel y/o turbinas de gas. Podemos ver que generalmente se recurre a plantas combinadas en los buques del tipo destructor o fragata si bien hay ejemplos de plantas no combinadas que emplean únicamente turbinas de gas como los destructores de la USN “Arleigh Burke” o una planta completamente eléctrica como los destructores de la clase 45 de la *Royal Navy* o los modernos destructores de la USN de la clase “Zumwalt”.

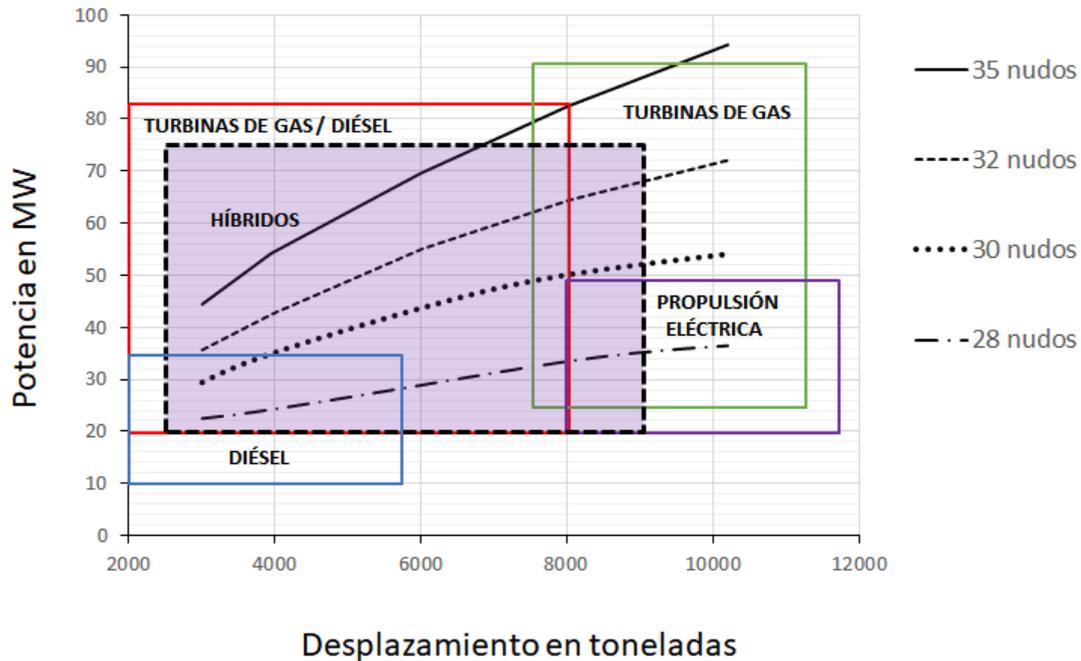


Figura 2.5: Relación desplazamiento y potencia. Rolls Royce (2018)

El gráfico muestra las áreas en las distintas soluciones aportadas por los distintos proyectos actuales y en desarrollo por las marinas de guerra más avanzadas del mundo. Se puede ver como las plantas puramente diésel se emplean para buques con desplazamientos cercanos a las 5.000 Tn y rangos de velocidad no superiores a 30 nudos con plantas de entre 10 y 35 Mega-Watt (MW) para la propulsión; las soluciones de turbinas de gas se emplean para desplazamientos entre 7.000 y 11.500 Tn y permiten velocidades de hasta 35 nudos con potencias que van desde los 20 MW a los 90 MW; la propulsión eléctrica se emplea en buques de 8.000 a 11.500 Tn con velocidades no superiores a los 29 nudos y potencias instaladas de 20 a 50 MW; por último tenemos las plantas híbridas de las anteriores que permiten operar en un rango amplio de velocidades y con plantas que van desde los 20 MW a los 80 MW de potencia dependiendo del desplazamiento.

Las plantas híbridas permiten combinaciones que suponen un ahorro importante en combustible, mantenimiento, son más eficientes en términos energéticos y respetuosas con el medio ambiente. Básicamente consiste en la suma de motores de explosión tradicionales o turbinas de gas y motores eléctricos alimentados por acumuladores o baterías.

Muchas empresas se han preocupado por desarrollar plantas propulsoras de este tipo en las que se combinan motores diésel con motores eléctricos de aplicación en buques off-shore, pesqueros o buques de guerra del tipo patrullero oceánico [22].

En el caso de estos últimos una propulsión híbrida favorece el ahorro energético y la navegación silenciosa. Hay estudios orientados a embarcaciones pequeñas de practica portuario que se emplean muchas horas y tienen un consumo elevado [23] permitiendo un ahorro considerable. También hay aplicaciones en buques de pesca. [24].

## 2.3. Parámetros de diseño del buque de guerra

Los buques de guerra son buques tecnológicamente complejos que como ya hemos dicho, son sistemas compuestos por dos elementos integrados que son la plataforma y el SC. Su diseño requiere de una gran cantidad de cálculos debido al número de variables que deben integrarse en su desarrollo y por tanto, podemos considerar que un buque como un sistema integrador de sistemas que hay que analizar como un todo. Tradicionalmente el análisis del buque, manteniendo al margen los estudios relacionados con la resistencia estructural, se elabora partiendo de un análisis estático relacionado con la capacidad de flotar y mantenerse estable en el agua y, por otro lado, es necesario que este sea capaz de moverse en el seno del mismo fluido lo que hace necesario un estudio dinámico directamente relacionado con parte de los parámetros estáticos del buque.

### 2.3.1. Dimensiones principales y estudio estático

El diseño de los buques en general contempla en primer lugar el control de las dimensiones principales del buque junto a una familia de coeficientes y otros elementos como la distribución de pesos, el comportamiento del buque en la mar y la reducción de la detección. Si bien esta tesis no es un trabajo de teoría del buque, es bueno que definamos aquí los parámetros principales que deben tenerse presentes en el estudio estático del buque que son:

- **Eslora ( $L$ ):** directamente relacionada con el cabeceo del buque y su oscilación vertical y las aceleraciones que se producen en sus extremos. Se corresponde con la medida longitudinal del buque desde la proa a la popa denominándose eslora máxima  $L_{Max}$ ; la eslora al nivel del mar es la eslora en la flotación  $L_f$  y la eslora medida desde el eje del timón hasta el punto donde la proa corta el agua es la denominada eslora entre perpendiculares  $L_{pp}$ . Las podemos ver representadas en la figura 2.6. Si la eslora aumenta reducimos el denominado cabeceo del buque y reduciremos las aceleraciones en sus extremos (proa y popa) que influyen en las operaciones con aeronaves y en el manejo de las armas.

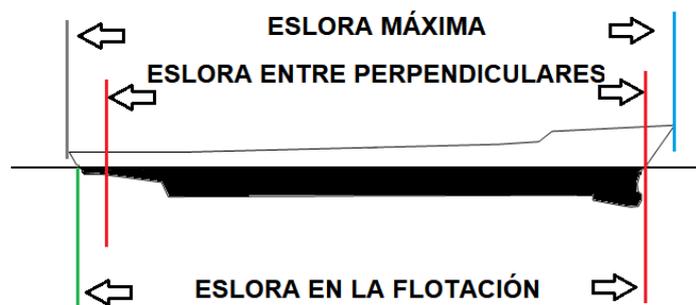


Figura 2.6: Esloras representativas del buque. Elaboración propia (2016)

- **Manga ( $B$ ):** proporciona la estabilidad adecuada al buque y es un parámetro importante para el balance. De la relación que tenga con la eslora ( $L/B$ ) ten-

dremos un elemento importante para conocer cual es el arrastre del buque. Cuanto más alta sea menor será el arrastre de agua.

- **Calado ( $T$ ):** con el que se persigue proporcionar la adecuada inmersión al SONAR de casco en el caso de buques de guerra y, en general, la inmersión de la hélice para evitar la cavitación.
- **Puntal ( $D$ ):** este va a dar la referencia del Francobordo (FB) que es la diferencia entre  $D$  y  $T$  así,  $FB = D - T$  que nos va a orientar sobre la reserva de flotabilidad y estabilidad en estado intacto y después de averías lo que es muy importante en buques de guerra (Figura 2.7).

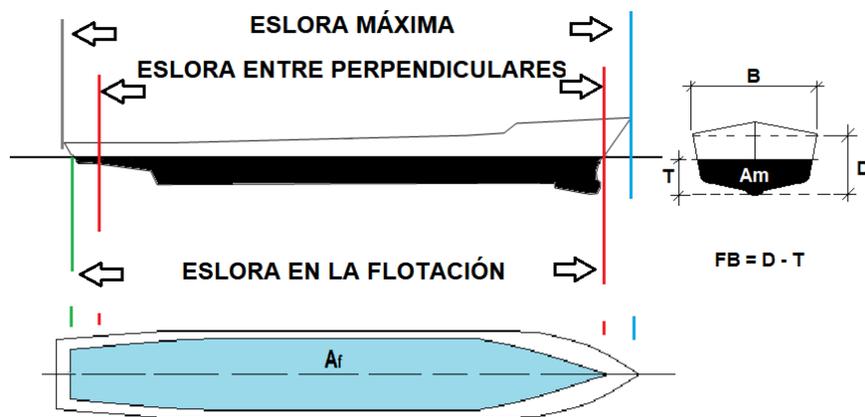


Figura 2.7: Parámetros de  $B$ ,  $T$ ,  $D$ ,  $FB$ ,  $A_f$  y  $A_m$ . Elaboración propia (2018)

En segundo lugar otros elementos importantes en el diseño del buque son los denominados coeficientes de formas o de carena del buque de los que destacaremos como más importantes:

- **Coefficiente del bloque ( $C_b$ ):** que nos da la relación de lo llenas que son las formas del buque considerado. Viene dado por la relación entre el volumen de carena  $V_{carena}$  y el volumen del paralelepípedo que lo contiene formado por  $L$ ,  $B$  y  $T$  según la fórmula 2.1. El volumen de carena es el volumen de la parte sumergida del buque.

$$C_b = \frac{V_{carena}}{L \times B \times T} \quad (2.1)$$

- **Coefficiente prismático longitudinal ( $C_p$ ):** directamente relacionado con la velocidad del buque en los distintos modos de operación para los que se diseña en el buque. Resulta del cociente entre el volumen de carena y el producto del área de la sección maestra  $A_m$  y la eslora  $L$  según 2.2.

$$C_p = \frac{V_{carena}}{A_m \times L} \quad (2.2)$$

- **Coefficiente de la flotación ( $C_f$ ):** relacionado con el comportamiento del buque en la mar. Viene dada por la expresión 2.3 que relaciona el área de la flotación  $A_f$  y el producto  $B \cdot T$ .

$$C_f = \frac{A_f}{B \times T} \quad (2.3)$$

Otro grupo de elementos importantes en el diseño del buque vienen dados por los siguientes parámetros y capacidades de estos:

- **Volúmenes:** el volumen del buque es limitado y es necesario optimizarlo para poder acomodar los distintos sistemas tanto de propulsión, como de generación, auxiliares, y SC (equipos electrónicos y armas).
- **Pesos:** Derivados de la distribución de los sistemas embarcados que está directamente relacionado con la estabilidad del buque y la reserva de flotabilidad.
- **Comportamiento del buque en la mar:** este era un tema complejo antaño pero, en la actualidad, las mejoras informáticas permiten analizar este de forma adelantada a la construcción y es fundamental para la operación del buque. La capacidad de operar con aeronaves está directamente relacionada con este tema al igual que las maniobras de aprovisionamiento en la mar de combustible, víveres, municiones y cualesquiera materias que se quieran traspasar desde otro buque.
- **El enmascaramiento:** fundamental para reducir las posibilidades de detección por el enemigo reduciendo las firmas propias del buque, la firma radar, la firma infrarroja (IR), la acústica submarina y la magnética fundamentalmente. La reducción de cada una de estas firmas se consigue de la siguiente forma:
  - *Firma radar:* se reduce empleando planos inclinados que reducen la onda reflejada, y uniones con aristas agudas combinado en ocasiones con materiales absorbentes de la radiación.
  - *Firma IR:* se reduce disipando el calor de los gases de escape, encapsulando los focos productores de calor como los motores principales o generadores. Buscamos reducir la firma térmica del buque para reducir la detección.
  - *Firma magnética:* se reduce empleando sistemas denominados de “degaussing” que reducen la firma magnética empleando bobinas que hacen que el buque no distorsione el campo magnético terrestre en sus desplazamientos. También se someten los cascos a procesos de desmagnetización del casco con procesos denominados “deperming”.
  - *Firma acústica submarina:* para reducirla se emplean acoplamientos flexibles para disipar la vibración de los equipos que tienen pulso y que no transmitan esta a la estructura del casco. También influirá en esto el propulsor, las líneas de ejes entre otros elementos del buque.

Todo lo anterior nos llevará a definir, por decirlo de una forma sencilla, un flotador de forma estática. El comportamiento del buque se analiza en primer lugar como si el buque fuese un flotador que situamos en un mar tranquilo y sin ningún tipo de

olas y/o viento. Posteriormente, es necesario analizarlo también de forma dinámica interactuando con el fluido a su alrededor y moviéndose en su seno y, a un tiempo, será necesario determinar las necesidades energéticas para desplazarlo y hacer funcionar todos los sistemas embarcados para ello es necesario evaluar su consumo energético. Los parámetros dinámicos del buque engloban estudios tanto de resistencia, como propulsión y gobierno.

### 2.3.2. Estudio dinámico

El buque al avanzar a una velocidad  $v$  dada en el fluido presenta una resistencia  $R$  al avance que es vencida gracias a una potencia denominada potencia efectiva  $P_E$  resultante de remolcar el buque en aguas tranquilas a una velocidad  $v$  dada. La resistencia  $R$  es la suma de dos componentes, la resistencia hidrodinámica de la carena  $R_h$  y la resistencia aerodinámica ya que, el buque se mueve entre dos fluidos, el agua y el aire siendo la más importante la resistencia hidrodinámica que se cifra generalmente en un 90% del total [25] a la velocidad de servicio del buque. De esta forma podemos escribir la ecuación 2.4

$$P_E = (R_h + R_a) \times v \quad (2.4)$$

De igual forma podemos decir que la resistencia total  $R$  es una función  $h$  que depende de las formas de la carena ( $f$ ), las propiedades del fluido (densidad  $\rho$  y viscosidad  $\mu$ ), la velocidad de desplazamiento ( $v$ ) y de la gravedad ( $g$ ) y podemos escribir la fórmula 2.5

$$R = h(f, \rho, \mu, v, g) \quad (2.5)$$

En 2.5 las formas de la carena influyen por parámetros ya comentados como la relación ( $L/B$ ) o  $B/T$  y coeficientes como el de la cuaderna maestra <sup>1</sup>  $C_m$  resultante de dividir 2.1 por 2.2 ; la distribución de los volúmenes dada por el  $C_b$  o el  $C_p$ . Otros elementos que influyen son la rugosidad del casco con un coeficiente de fricción  $C_a$  o la capilaridad pero que, en el caso de buques, se puede considerar despreciable así, teniendo en cuenta lo anterior podemos escribirla 2.5 como:

$$R = h\left(\frac{L}{B}, \frac{B}{T}, C_b, C_p, C_m, C_a, \rho, \mu, v, g\right) \quad (2.6)$$

Por tanto, la potencia efectiva  $P_E$  se verá afectada de igual forma por todas estas variables. Como ya hemos dicho, todos estos estudios se hacen en aguas tranquilas y con fluido ideal, pero la realidad es bien distinta y nos obliga a considerar las variables descritas en 2.6. De forma general la resistencia al avance se desglosa en tres componentes que son la resistencia de fricción  $R_f$ , la resistencia por formación de olas  $R_w$  y la resistencia de forma  $R_s$  que podemos escribir:

$$R = R_f + R_w + R_s \quad (2.7)$$

<sup>1</sup>Los barcos se dividen en cuadernas para su dimensionamiento y construcción, así tenemos cuadernas de trazado con las que dibujamos y damos forma al buque y cuadernas de construcción físicas resistentes que no tienen que coincidir. Como norma general se numeran desde la Perpendicular de Popa, donde esta la cuaderna cero a espacios constantes positivos a proa y negativos a popa de esta. La cuaderna maestra suele coincidir con la cuaderna central del buque y es la que viene dada por la manga máxima en la zona de formas más llenas del mismo.

La resistencia de forma  $R_s$  en 2.7 está compuesta por la perturbación que a la carena ( $V_{carena}$ ) somete el fluido circundante acelerando las partículas del mismo generando el denominado tren de olas, y la formación de torbellinos en las zonas que debido a la curvatura de la carena o a los denominados apéndices que sobresalen de esta y producen rotación en las partículas del fluido como las hélices, arbotantes de soporte de ejes de las anteriores, aletas estabilizadoras, timones, quillas de balance o domo del sonar. Podemos ahora reescribir 2.4 como:

$$P_E = (R_f + R_w + R_s + R_a) \times v \quad (2.8)$$

En la figura 2.8 podemos ver de forma gráfica lo arriba explicado. El buque al moverse por el agua produce una perturbación del fluido que genera trenes de olas que absorben energía ( $R_w$ ), en su movimiento el aire y el agua generaran una resistencia por fricción ( $R_f$  y  $R_a$ ) adicional a la de formación de olas que se verá aumentada en función de las formas del buque ( $R_s$ ). Todo ello en principio sin unirse a las condiciones ambientales que deben ser estudiadas paralelamente para conocer como el movimiento del buque se ve afectado en su comportamiento en la mar por la aparición de la acción del viento, de los trenes de olas y corrientes.

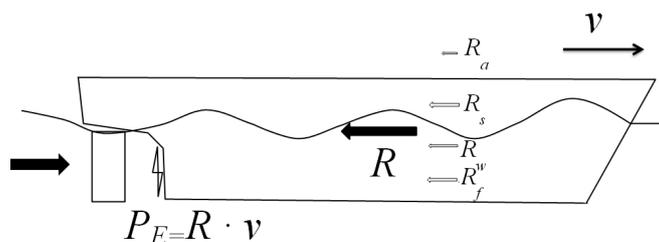


Figura 2.8: Resistencia al avance. Elaboración propia (2018)

## 2.4. El consumo energético en buques de guerra

Evidentemente, esta resistencia tiene que ser superada por algún medio por lo que se hace necesario efectuar estudios que se denominan de propulsión para determinar el tamaño de los motores que van a mover nuestro barco y no solo esto, es necesario también determinar la energía necesaria para alimentar el resto de sistemas que embarcaremos, todo ello requiere de un estudio de potencia necesaria para la propulsión por una parte y de la potencia necesaria para los consumidores por otra.

### 2.4.1. La propulsión

Hemos visto en el punto anterior de forma somera como se determina la resistencia al avance del buque  $R$  y sus componentes. Esta  $R$  es variable y depende de la velocidad a la que queramos mover nuestro buque o velocidad de servicio, para poder alcanzar esta velocidad será necesaria la aparición de una fuerza que supere la resistencia al avance del buque. Esta fuerza de propulsión es lo que se denomina empuje y lo escribiremos con la letra  $T$ . Ya hemos visto con anterioridad la evolución

de la vela y el remo a la propulsión mecánica con el uso de la máquina de vapor en los buques desde la segunda mitad del siglo XIX de forma generalizada. El empleo de la propulsión mecánica requirió de la necesidad de evaluar la potencia necesaria para poder mover el buque en un principio y, posteriormente, con la implantación de mejoras tecnológicas de todo tipo requirió de la necesidad de evaluar mediante un balance eléctrico el consumo de los distintos equipos y sistemas que se embarcaban.

En el caso de los buques de guerra cualquiera de las opciones de las que hemos hablado en el apartado 2.2.2 tendrá que ser concebido para vencer la resistencia del buque al avance  $R$  así, será necesaria una potencia suministrada por el motor propulsor que genere un empuje  $T$ .

La potencia efectiva necesaria para mover el buque dependerá de una serie de factores que son [26]:

1. Tipo de combustible empleado propiedades y calidad del mismo.
2. El rendimiento del motor en la conversión de la energía potencial del combustible en la potencia.
3. El rendimiento del elemento propulsor del buque para generar el empuje  $T$  para vencer la  $R$  y mover el buque a la velocidad  $v$  deseada.

De las formas de la carena del buque y del tipo de propulsor o propulsores que empleemos para una condición dada, dependerá la magnitud de  $R$  y de  $T$ , buscando siempre minimizar la resistencia ( $R$ ) y maximizar el empuje ( $T$ ). Las componentes básicas de la potencia que consideraremos en nuestro caso serán tres:

- Potencia de servicio del motor ( $P_S$ ): es la potencia que podemos medir cuando el motor está a régimen justo a su salida.
- Potencia entregada ( $P_D$ ): es la potencia que llega al propulsor.
- Potencia efectiva ( $P_E$ ): es la potencia necesaria para generar el empuje.

Estas las podemos relacionar en función de sus rendimientos  $\eta$ , denominaremos al rendimiento  $\eta_D$  al rendimiento de propulsión y al rendimiento  $\eta_T$  de la transmisión pudiendo establecer la relación 2.9 entre la potencia de servicio y entregada y la relación 2.10 entre la entregada y efectiva siendo  $P_E = R \times v$ .

$$P_S = \frac{P_D}{\eta_T} \quad (2.9)$$

$$P_D = \frac{P_E}{\eta_D} \quad (2.10)$$

En la figura 2.9 podemos ver de forma esquemática lo arriba explicado. Del motor sale la potencia entregada  $P_D$ , esta se reduce debido al rendimiento de transmisión  $\eta_T$  y resulta la potencia entregada al propulsor  $P_D$  que resulta afectada por el rendimiento  $\eta_D$  resultando la potencia  $P_E$  necesaria para generar el empuje  $T$ . Hemos dado una explicación muy somera del proceso si bien este es mucho más complejo pues el rendimiento  $\eta_D$  necesita para su cálculo del concurso de, entre otros, el rendimiento del casco pero, para poder tener una visión más general y como elemento de aproximación, este análisis se considera suficiente.

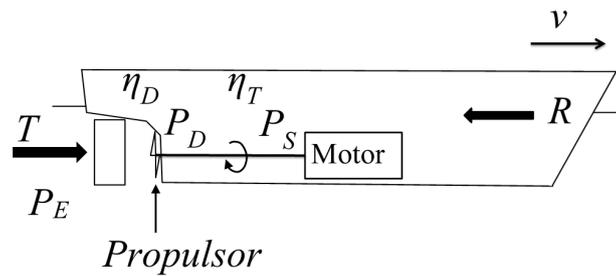


Figura 2.9: Potencias y rendimientos. Elaboración propia (2018)

### 2.4.2. Gobierno del buque

El gobierno de cualquier buque es fundamental para poder mantener su rumbo navegando o bien para cambiar este y controlarlo. El control del gobierno corresponde al piloto que puede ser humano o automático y, cualquiera que sea, debe ser capaz de controlar el rumbo pudiendo efectuar los cambios en el mismo que sean necesarios de forma segura, rápida y precisa. Los elementos fundamentales de gobierno del buque son el timón y el propulsor ya que este último influye también en las maniobras del buque para variar su rumbo. El timón, que generalmente se coloca en la popa del buque por popa del propulsor, consiste básicamente en un plano perpendicular al agua, sumergido que puede moverse para formar un ángulo con la línea de desplazamiento del buque (su rumbo) a una u otra banda que permita variar este.

### 2.4.3. Balance eléctrico del buque

En todo sistema buque es necesario conocer los consumidores instalados para poder diseñar la planta de generación de energía suficiente que permita su correcto funcionamiento [20]. Debemos conocer el consumo energético del buque a través de su balance eléctrico que determina las distintas SCE.

El balance eléctrico del buque se puede hacer de cuatro formas fundamentales que generalmente se combinan durante el desarrollo del proyecto del buque empleándose en uno u otro momento en base, fundamentalmente, a la información de la que se dispone sobre los consumidores embarcados:

- Balance eléctrico en base a fórmulas.
- Balance eléctrico de buque base.
- Balance eléctrico clásico.
- Balance eléctrico avanzado.

#### Balance eléctrico en base a fórmulas

Es estimado y se emplea en estadios muy incipientes del proyecto de anteproyecto y dimensionado general. Se emplean fórmulas como la siguiente obteniendo siempre un valor estimado aproximado.  $P = 0,015P_s + 1,6N + \sqrt{N} + 80$  donde  $P$  es la

potencia en kW;  $P_S$  es la potencia propulsora del buque en kW y  $N$  es el número de tripulantes. Esta fórmula da un número muy grosero y no se aproxima a la realidad final del buque.

### Balance de valor de buque base

Emplea proporcionalidad con respecto a un buque de características similares y dimensiones parecidas. Es un valor de orientación y también aproximado. Se emplea en los inicios del proyecto pudiendo hacer dos tipos de aproximación:

1. Aproximación global buque a buque. Hacemos una comparativa general sin más fijándonos en las características de los elementos de forma amplia.
2. Aproximación proporcional. En este caso hacemos una comparativa de ciertas características concretas como por ejemplo: la eslora, la potencia propulsora, la tripulación total o el Numeral de Equipo.

### Balance clásico

Este es el que se utiliza para calcular la planta real del buque. Se basa en cálculos probabilísticos que, si bien no es el procedimiento más correcto, por lo poco ajustado a criterios de diseño en ingeniería de carácter dinámico, el método funciona perfectamente aplicado al diseño de plantas de generación para buques pero fuera de parámetros y consideraciones de EE. Para el cálculo del balance eléctrico necesitaremos conocer lo siguiente:

1. Consumidores abordo. Todos aquellos sistemas y equipos con consumo eléctrico en el barco, su cantidad y características.
2. Las SCE. En las que se definen los consumidores que tenemos en cada momento en funcionamiento y la cantidad o proporción de los mismos caso de ser varios en funcionamiento.
3. Coeficientes de cálculo ( $K$ ). Estos coeficientes son cinco y se definen como sigue:
  - a) Coeficiente de simultaneidad en marcha ( $K_n$ ): este coeficiente ofrece una relación entre el número de equipos iguales instalados y el número de ellos que se encuentra en funcionamiento en cada condición de carga. Es menor o igual a 1 y se obtiene de la fórmula 2.11

$$K_n = \frac{N \text{ Equipos iguales Arrancados}}{N \text{ Equipos iguales}} \quad (2.11)$$

- b) Coeficiente de Servicio y Régimen ( $K_{sr}$ ): este coeficiente es el definido por la fórmula 2.12

$$K_{sr} = K_s \times K_r \quad (2.12)$$

Para buques con medios propios de carga y descarga, se suele emplear una fórmula aproximada para el cálculo de  $K_{sr}$  2.13 donde  $n$  es el número de grúas para las maniobras de carga y descarga

$$K_{sr} = \left( \frac{1 + 0,3(n-1)}{n} \right) \quad (2.13)$$

- c) Coeficiente de Servicio ( $K_s$ ): da una relación del tiempo de funcionamiento sobre el tiempo base tomado para el balance eléctrico, es decir, el tiempo real de funcionamiento en el tiempo unidad como por ejemplo arrancada de 15 minutos cada hora que dará una relación de 1 a 4. Oscila entre 0 y 1 según la fórmula 2.14

$$K_s = \frac{\text{Tiempo en Marcha}}{\text{Tiempo Unitario Base}} \quad (2.14)$$

- d) Coeficiente de Régimen ( $K_r$ ): este coeficiente nos dará el régimen de potencia en cada momento de ese elemento, oscilara entre 0 y 1 también según la relación Potencia de Régimen del Consumidor ( $P_{reg}$ ) y la Potencia Máxima del Consumidor ( $P_{Max}$ ) 2.15.

$$K_r = \frac{P_{reg}}{P_{Max}} \quad (2.15)$$

- e) Coeficiente de Utilización ( $K_u$ ): este coeficiente es resultado del producto de  $K_n$  y  $K_{sr}$ . Es el coeficiente fundamental para el cálculo del balance eléctrico 2.16

$$K_u = K_n \times K_{sr} \quad (2.16)$$

En toda la bibliografía y trabajos consultados [27] [28] [29] [30], de forma general se consideran unos valores promedio dependiendo del nivel de utilización en el tiempo así podemos considerar el cuadro 2.2 para escoger nuestro  $K_{sr}$  donde  $PN$  es la potencia nominal y  $t$  el tiempo de funcionamiento.

%PN	%t	$K_{sr}$	Estado del consumidor en cada SCE
100	100	1	Consumidores a plena carga todo el tiempo
> 75	> 80	0,8	Consumidores casi a plena carga casi todo el tiempo
100	50	0,4-0,5	Consumidores a plena carga la mitad del tiempo
50	100	0,4-0,5	Consumidores a media carga todo el tiempo
100	< 10	0,1	Consumidores de uso ocasional
0	0	0	Equipos inoperativos

Cuadro 2.2: Valores de Ksr. Elaboración propia (2016)

### Balance avanzado

El balance eléctrico avanzado consiste en aplicar un valor de avance a cada elemento eléctrico o consumidor el cual basamos en el valor del  $\cos(\varphi)$  del ángulo de fase para obtener la potencia en kilo-voltio-amperios  $KvA$ . Conocidos todos los parámetros, datos y coeficientes anteriormente citados, lo normal es elaborar una hoja de cálculo que nos permita conocer los valores de consumo equipo por equipo, y para cada SCE y el total que para cada una de las anteriores tenemos. La tabla en forma esquemática puede ser se ve en el cuadro 2.3. Los elementos que reflejamos son los consumidores ( $Cons.$ ), el número de estos ( $N$ ). la potencia unitaria ( $P_u$ ), la potencia activa ( $P_a$ ), la potencia total ( $P_T$ ) y las distintas situaciones de carga que consideremos  $SCE_j$ . De esta forma obtendremos unos valores totales de consumo

para cada una de las SCE eléctrica que en el caso de buques de guerra son las que vemos reflejadas en el apartado sobre modos de operación del buque de guerra según 2.17.

$$SCE_i = \sum_{j=1}^n SCE_{i,j} \quad (2.17)$$

<i>Cons.</i>	<i>N</i>	<i>P<sub>u</sub></i>	<i>P<sub>a</sub></i>	<i>P<sub>t</sub></i>	<i>SCE<sub>1</sub></i>	...	<i>SCE<sub>i</sub></i>
1	<i>x<sub>1</sub></i>	<i>P<sub>u,1</sub></i>	<i>P<sub>a,1</sub></i>	<i>P<sub>t,1</sub></i>	<i>SCE<sub>1,1</sub></i>	...	<i>SCE<sub>i,1</sub></i>
...	...	...	...	...	...	...	...
n	<i>x<sub>n</sub></i>	<i>P<sub>u,n</sub></i>	<i>P<sub>a,n</sub></i>	<i>P<sub>t,n</sub></i>	<i>SCE<sub>1,n</sub></i>	...	<i>SCE<sub>i,n</sub></i>

Cuadro 2.3: Hoja de cálculo para las SCEi. Elaboración propia (2016)

#### 2.4.4. Estructura analítica del buque de guerra

Esta es la denominada en inglés Expanded Ship Work Breakdown Structure (ESWBS) [31], es un sistema que se emplea para denominar los distintos elementos que entran en juego en la construcción de un buque desde la gestación de su proyecto preliminar, pasando por su construcción, su ciclo de vida y hasta su desguace. Consiste en un grupo de números que encuadran en todos los elementos implicados en grupos, subgrupos y elementos. Este desglose se emplea fundamentalmente para los conceptos relacionados con las especificaciones contractuales del buque, los costes, el control de pesos, elementos de diseño y documentación asociada, funcionamiento y eficacia de los sistemas, producción y mantenimiento. Los grupos en los que se divide son diez, numerados con tres dígitos comenzando en 000 y finalizando en 900 por centenas enteras. Los diez grupos así creados se denominan:

- 000 Condiciones generales y administrativas.
- 100 Estructura del casco. Todos los elementos pertenecientes a la topología estructural del buque
- 200 Planta propulsora. Todos aquellos elementos relacionados directamente con la propulsión.
- 300 Planta eléctrica. Todo lo que se relaciona directamente con la producción eléctrica y su distribución.
- 400 Mando y control. El SC, los equipos de navegación o los de comunicaciones están en este grupo.
- 500 Sistemas auxiliares. Es el más numeroso y encuadra todos los elementos que sirven para hacer funcionar a los demás como el HVAC, las bombas de combustible o las plantas de ósmosis por poner algún ejemplo.
- 600 Equipo y habitabilidad. Como las marmitas de la cocina, las máquinas del gimnasio o el material de la enfermería.
- 700 Armas. Aquí tenemos elementos como los cañones, lanzadores de misiles o de torpedos.

- 800 Integración e ingeniería.
- 900 Buque y servicios de apoyo.

Podemos decir que los grupos que van del 100 al 700 son los grupos en los que clasificaremos todos los elementos físicos que instalamos en el buque así, el acero del buque se encuadrará en el grupo 100, las hélices en el 200, los alternadores en el 300, el SC en el 400, el sistema de HVAC como elemento auxiliar en el 500, los ánodos de sacrificio de la protección catódica en el 600 y el cañón en el 700.

Dentro de cada grupo se establecerán subgrupos siguiendo reglas pautadas y, por ejemplo, en el grupo 100 existe un subgrupo 110 que se refiere al forro y estructuras de soporte en el que a su vez, existe un elemento que es el 111 que representa las planchas de forro para los buques de superficie y el casco resistente en el caso de submarinos. Los subgrupos termina en cero y los elementos se numeran de 1 a 9 dentro de cada subgrupo.

### 2.4.5. Modos de navegación del buque de guerra

Los modos de navegación [32] para los que se vienen diseñando los buques de guerra se basan en convenios comúnmente aceptados por los países de nuestro entorno. De forma resumida los modos de funcionamiento de los buques de guerra están relacionados con el uso que se está dando en cada momento al buque y se clasifican de la siguiente forma:

1. **Fondeado o “Anchor”**. Es una condición de funcionamiento del buque en la que el mismo suministra toda la energía eléctrica mientras el buque está fondeado por sus medios.
2. **En puerto o “Shore”**. Es una condición de funcionamiento nave en la que el buque recibe toda la energía eléctrica de una instalación en puerto donde puede también ser desde sus propios medios.
3. **Crucero o “Cruising”**. Una condición de crucero es un modo de funcionamiento del buque relacionada con:
  - a) Condición III de crucero de tiempo de guerra según se define en la EC y ET para los buques de combate propiamente dichos como es el caso de las fragatas o destructores.
  - b) Navegación a una velocidad de crucero especificada; manteniendo la capacidad de autodefensa si se contempla esta.
4. **Operación o “Function”**. Es una condición de funcionamiento en la que el barco está desempeñando las funciones para las que ha sido creado diseñada. Como ejemplos de una condición funcional:
  - a) Combate para destructores y fragatas.
  - b) Operación aérea para portaaviones.
  - c) Operación de carga y descarga en buques de guerra anfibia.
  - d) Aprovisionamiento en el mar para buques de apoyo y almacén.

- e) Operaciones de reparación para los buques de reparación y mantenimiento.
5. **Emergencia o “Emergency”**. Es una condición de funcionamiento del buque en la que este se encuentra suministrando carga eléctrica a los siguientes elementos según buque:
- a) Buques de combate de superficie. El control del buque en emergencias, elementos vitales de emergencia y armas de defensa.
  - b) Portaaviones. Control de buque en emergencias, carga eléctrica a armas específicas para derribar aeronaves y limitando las operaciones aéreas a la recuperación de aeronaves.
  - c) Buque anfibia. Control de la nave en emergencia limitando la operación de descarga.
  - d) Buques auxiliares. En el caso de España las que se determinen en las Especificaciones de Contrato (EC) y las que por ley vengan impuestas. Los EE.UU. regulan estas por reglamento Federal.
  - e) Patrulleros y guerra de minas. El control de la nave en emergencia.

Esta clasificación de modos de funcionamiento establece una serie de factores de carga para cada uno de los equipos y sistemas implicados en las mismas de forma estática es decir, no llevan asociado un análisis dinámico de la situación y por tanto consideran el consumo una vez alcanzados los de régimen de los distintos sistemas y equipos implicados. En resumen podemos remitirnos a la figura 2.10 en la que vemos como partiendo del tipo de buque de guerra determinamos los sistemas característicos del mismo así, por ejemplo, en el caso de un portaaviones serán necesarios sistemas de lanzamiento de aviones denominados catapultas, o ascensores para aeronaves; en el caso de un buque de escolta serán necesarios sistemas de RADAR que permitan exploración de áreas amplias para dar protección a buques importantes como los portaaviones, los transportes de tropas o buques hospital; para los buques de transporte de tropas serán necesarios medios de descarga para material como grúas o rampas para vehículos. Dependiendo también del tipo de propulsión que se considere y de generación eléctrica embarcaremos un tipo u otro de sistemas de propulsión y generación (turbinas de gas o motores diésel por ejemplo).

Con todos los sistemas definidos determinaremos, por una parte los modos de operación descritos en el apartado 2.4.5, las condiciones ambientales <sup>2</sup> y los consumidores que van a trabajar en cada modo los cuales, agruparemos en las familias descritas en el apartado 2.4.4 asignándole a cada uno de ellos un factor de carga de funcionamiento lo que nos dará un consumo. Sumados todos estos consumos podremos establecer las distintas situaciones de carga eléctrica del buque.

---

<sup>2</sup>Cuando nos referimos a condiciones ambientales lo hacemos aquí a las condiciones exteriores al buque. Generalmente se consideran dos extremos en el diseño tradicional de buques de guerra que son: condiciones de verano y condicione de invierno. En el capítulo tres las describimos de forma más detallada.

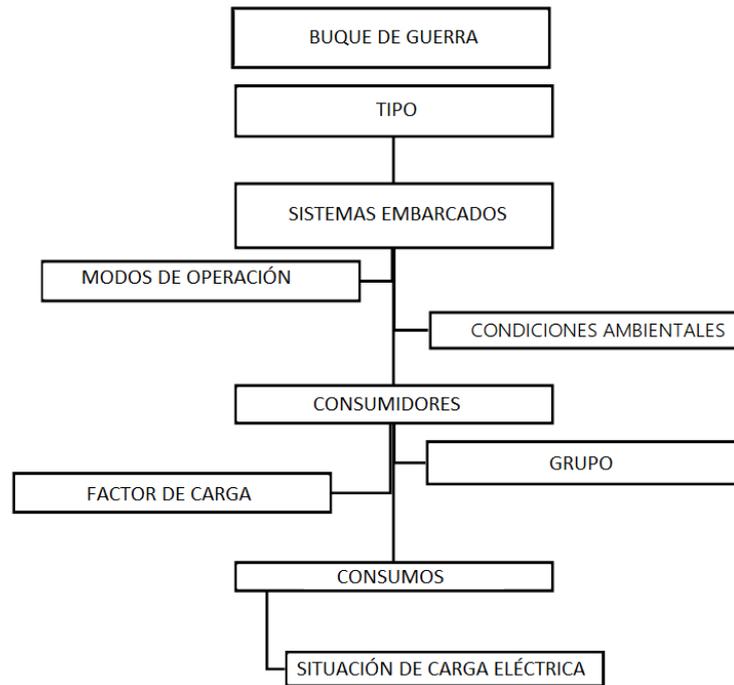


Figura 2.10: Esquema de desarrollo del balance. Elaboración propia (2016)

## 2.5. Gestión energética y la ISO 50001

Como ya hemos dicho, la energía es fundamental para el desarrollo y por tanto, los retos que se nos presentan en la gestión ambiental en la actualidad se deben enmarcar en tres campos:

- Cambio climático: relacionado con al implantación de medidas destinadas a potenciar el cuidado ambiental.
- Seguridad energética: relacionado con el acceso a las fuentes de energía asegurando su suministro y estabilidad.
- Competitividad y eficacia: enfocadas a la obtención de modelos energéticos óptimos en las organizaciones.

La norma ISO 50001 (sustitución de la EN 16001) establece los requisitos necesarios para que cualquier organización integre dentro de su gestión la cuestión energética [33] [34] [35] [36]. Para ello deberá implantar un sistema de gestión específico.

La nueva norma incorpora cambios sustanciales en la filosofía de aplicación; en ella se habla de la planificación energética y de la revisión del sistema energético buscando la mejora del mismo. De forma resumida, la planificación energética de cualquier organización requerirá de los siguientes elementos:

1. **Revisión inicial del sistema energético:** de tal forma que esta nos lleve a establecer la línea de base energética que nos diga como consumimos y en donde. Así podremos concentrar los esfuerzos de mejora en los elementos de mayor peso en el consumo como puede ser en el caso de los buques de guerra la climatización, la propulsión o el alumbrado.

2. **Construcción de indicadores energéticos:** estos nos facilitarán conocer cuanto consumimos en los distintos procesos, trabajos o equipamiento. En el caso de los buques de guerra se pueden buscar indicadores referidos a los modos de operación o indicadores de desempeño.
3. **Control operacional pautado:** nos facilitará controlar funciones o actuaciones en los sistemas mediante el uso de procedimientos de eficiencia, pautas clave en un mantenimiento más eficiente, adquisición de equipos y sistemas eficientes y registro de su comportamiento.
4. **Seguimiento, medición y monitorización de datos:** es importante la captura y monitorización de los datos; el análisis de los mismos será de vital importancia en la gestión energética; los balances periódicos y las comparaciones con la línea base establecida con anterioridad nos permitirá adoptar las medidas necesarias para la mejora del sistema.

Con todo lo anterior buscamos alcanzar cuatro metas fundamentales:

1. Reducir el consumo energético.
2. Dar cumplimiento a la legislación vigente.
3. Ahorrar costes mejorando la eficacia.
4. Facilitar los trabajos de auditoría energética.

Esta normativa se está aplicando también en el campo militar en países como EE.UU. [37] y en el sector marítimo [38].

## 2.6. Normativa de EE en el sector naval

Desde la constatación del cambio climático a finales del siglo XX [4] organizaciones públicas y privadas encaminaron sus pasos a la elaboración de normativas, reglamentos y legislación orientada a potenciar la EE en todos los campos de actividad [39] [40] de igual forma esta normativa dio lugar a la aparición de estudios en EE para la edificación, el empleo de energías renovables [41] [42] [43]. Los estudios orientados al campo naval militar fueron más escasos en principio y liderados por países como EE.UU., el Reino Unido o la Unión Europea (UE) [44] [45].

El control y la reducción de los gases de efecto invernadero en el sector naval es primordial desde un punto de vista de EE si tenemos presente que el transporte marítimo supone el 90% del transporte de productos a nivel mundial, y el 74% a nivel de la UE, representando el 10% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global [46].

Refiriéndonos al sector naval en general, el marco regulador en EE y obligatorio para todos los buques mercantes, no engloba a los buques de guerra.

Las medidas para la mejora de la EE introducidas por la International Maritime Organisation (IMO) dictadas por los Marine Environment Protection Committee (MEPC) hasta la fecha, e incluidas en el Convenio para la prevención de la contaminación marina (MARPOL) anexo VI que fue aprobado en 1997, con regulaciones en el campo de la prevención de la contaminación atmosférica, y que entró en vigor el 19 de mayo del 2005 compuesto por las siguientes normativas:

1. El Índice de EE de Proyecto, Energy Efficiency Design Index (EEDI).
2. El Plan de Gestión de la EE del Buque, Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).
3. El Indicador Operacional de la EE, Energy Efficiency Operational Index (EEOI).
4. Sistema de Recopilación de Datos Sobre el Consumo de Combustible en Buques (SRDCCB).

Todas ellas incluidas en el MEPC 63 de julio de 2011 [47] [48]. Se incluye asimismo la reciente normativa de la OMI sobre el sistema de recopilación de datos sobre el consumo de combustible de los buques, basado en el Reglamento de la Unión Europea y presentado en el MEPC 70 de octubre de 2016, y aún con directrices y circulares en proceso de elaboración [49].

En lo referente a la UE, el Reglamento UE-2015/757 [50] establece una serie de normas para sistema de Seguimiento Notificación y Verificación (SNV) de las emisiones de dióxido de carbono y otra información pertinente para buques que arriben, zarpen o se encuentren en puertos bajo jurisdicción de un estado miembro como política de reducción del consumo de combustible a bordo de los buques y, consecuentemente, reducir así las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

En el caso de los buques de guerra, las marinas occidentales emplean normativas genéricas que sirven de guías para determinar el tamaño de las plantas de generación de potencia como es la Design Data Sheet (DDS) número 310 de la USN en el diseño de plantas de generación a bordo; la Allied Naval Engineering Publication (ANEP)-41 de la OTAN para la evaluación del coste de buques de guerra [51] o estudios independientes, en el caso de nuestro país, que buscan de forma general estimar el coste del ciclo de vida de un sistemas de armas [52], pero no existe una normativa de carácter internacional o nacional obligatoria enfocada a la EE de forma explícita.

### 2.6.1. El EEDI

El índice de EE de diseño ofrece información en la materia para buques de nueva construcción y permite determinar la masa de  $CO_2$  emitido a la atmósfera en gramos por cantidad de carga transportada en toneladas por milla ( $Tn \times nm$ ). Busca incentivar el desarrollo tecnológico y la innovación para la mejora de la EE. Pudiendo establecerse, para un barco de nueva construcción, un umbral por debajo del cual el buque no pueda ser aprobado permitiendo a los astilleros calcular el EEDI optimizando el aprovechamiento energético en el diseño del buque [53]; su cálculo de forma simplificada sigue la ecuación 2.18 cuyas unidades son  $g CO_2/Tn \times nm$  (gramos de dióxido de carbono por milla navegada).

$$EEDI = \frac{EMP + EMA + TEEA - TEEP}{VTR} \quad (2.18)$$

Cada uno de los miembros de la ecuación 2.18 se corresponde con los valores de:

- *EEDI*: Índice de EE de Diseño.
- *EMP*: Emisiones del Motor Principal.
- *EMA*: Emisiones de Motores Auxiliares.

- *TEEA*: Tecnologías implementadas para mejora de la EE en generación de Auxiliares.
- *TEEP*: Tecnologías implementadas para mejora de la EE en la Propulsión.
- *VTR*: Valor del Trabajo Realizado. Esta fórmula puede no ser aplicable a buques de propulsión diésel-eléctrica, turbinas o sistemas de propulsión híbrida a excepción de cruceros de pasajeros y buques de carga de gas natural licuado (GNL).

La expresión matemática de cada uno de los bloques de la ecuación 2.18 y sus unidades de medida son las siguientes:

### EMP

Está directamente relacionado con las emisiones de  $CO_2$  de la propulsión su expresión y unidades son las que vemos en 2.19

$$EMP = \left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \times \left( \sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \times C_{FME(i)} \times SFC_{ME(i)} \right) \quad (2.19)$$

Donde:

$f_j [-]$ : es el factor de corrección que tiene presentes elementos específicos del tipo de buque como por ejemplo, la corrección por potencia para buques que navegan en zona de hielos. Cuando no exista dicha corrección será igual a 1.

$P_{ME(i)} [kW]$ : es la potencia de los motores principales indicada como el 75% de la potencia nominal que se corresponde con la potencia máxima que puede desarrollar el motor.

$C_{FME(i)} [gCO_2/gfuel]$ : es el coeficiente de conversión del  $CO_2$  del combustible utilizado en el motor principal del buque.

$SFC_{ME(i)} [g fuel/kWh]$ : es el consumo específico de combustible del motor principal según los valores de certificación de  $NO_x$  para la potencia  $P_{ME(i)}$ .

### EMA

Son el total de las emisiones de  $CO_2$  producidas por los auxiliares que generan la electricidad necesaria para el funcionamiento de los sistemas del buque.

$$EMA = P_{AE} \times C_{FAE} \times SFC_{AE} \quad (2.20)$$

Donde:

$P_{AE} [kW]$ : es la demanda de potencia de los motores auxiliares para condiciones normales de navegación del buque.

$C_{FAE} [g CO_2/g fuel]$ : es el coeficiente de conversión de  $CO_2$  del combustible utilizado en los motores auxiliares.

$SFC_{AE}$  [ $g\ fuel/kWh$ ]: es el consumo específico de combustible de los motores auxiliares, para valores de certificación  $NO_x$ .

Si parte de la carga nominal máxima en el mar se obtiene con generadores acoplados al eje, para esa potencia podrá utilizarse en 2.20 los factores  $SFC_{ME}$  y  $C_{FME}$  en lugar de  $SFC_{AE}$  y  $C_{FAE}$ . Estos factores son referidos en las mismas unidades pero su consumo está relacionado con el consumo del motor principal que mueve el eje de la hélice.

### TEEA

Compuesto por dos sumandos que son, por un lado, las emisiones debidas al motor generador de retroalimentación del eje cuando disponen de este el cual, reduce la potencia necesaria  $P_{PTI(i)}$  y las tecnologías implementadas para la mejora de la EE en la generación eléctrica de los motores auxiliares, contribuyendo con un valor  $P_{AEff(i)}$ .

$$TEEA = \left( \left( \prod_{j=1}^n f_j \times \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \times P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \times SFC_{AE} \right) \quad (2.21)$$

Donde:

$P_{PTI(i)}$  [ $kW$ ]: es la potencia de cada uno de los motores generadores al 75% dividida por la media ponderada de la eficiencia de cada generador de retroalimentación al eje cuando existen.

$n_{PTI}$  [-]: número de sistemas de recuperación de energía.

$f_{eff}$  [-]: es un factor corrector que depende de las tecnologías en EE empleadas en el diseño y, valdrá 1, cuando estas existan.

$P_{AEff(i)}$  [ $kW$ ]: reducción de potencia debido al uso de mejoras de eficiencia en los motores auxiliares.

### TEEP

Este elemento del numerador incluye tecnologías que provea de potencia mecánica para la propulsión del buque como pueden ser las velas sin consumos de combustibles fósiles cuya expresión es:

$$TEEP = \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \times P_{eff(i)} \times C_{FME} \times SFC_{ME} \quad (2.22)$$

Donde:

$P_{eff(i)}$  [ $kW$ ] es el 75% de la potencia instalada de las tecnologías que contribuyen a la propulsión del buque de tipo renovable.

**VTR**

El valor de trabajo realizado viene dado por la siguiente expresión:

$$VTR = f_i \times f_c \times f_l \times Capacity \times f_w \times V_{ref} \quad (2.23)$$

Donde:

$f_i$  [-]: se corresponde con el factor de corrección de elementos de diseño específicos del buque que le limiten la capacidad (se considera el valor 1,0 si no se estima).

$f_c$  [-]: es el factor corrector de capacidad de buques con tipos de carga alternativa que afecten la relación peso muerto ( $TPM$ ) o *Capacidad* (Por ejemplo buques que usan Gas Natural Licuado (GNL) en el sector de los gaseros).

$f_l$  [-]: factor de corrección por limitación reglamentaria técnica del buque que restrinja su capacidad. (se considera de valor 1,0 si no existen).

*Capacity* [Tn]: es el peso muerto ( $TPM$ ) para buques graneleros, gaseros y petroleros. El 70% del  $TPM$  será el considerado para buques portacontenedores.

$f_w$  [-]: es el coeficiente indicativo de la disminución de velocidad debida a condiciones meteorológicas adversas.

$V_{ref}$  [nm/h]: que es la velocidad de referencia del buque relacionada con la potencia de propulsión  $P_{ME}$ , bajo condiciones de mar en calma y con el plano de flotación denominada de verano.

Esta fórmula es la base que se está empleando de forma obligatoria durante la fase de diseño de los buques mercantes pero que no es obligatoria en buques de guerra y de hecho no se aplica en la Armada Española por poner un ejemplo.

**2.6.2. EL SEEMP**

La IMO emitió en 2009 el estudio sobre gases de efecto invernadero reconociendo en este la imperiosa necesidad de proceder a la elaboración de un plan de vigilancia ambiental tanto de buques como de compañías navieras. Este plan es el “Ship Energy Efficiency Management Plan” (SEEMP) [54].

La gran variedad de buques existentes en el ámbito civil hizo necesaria la creación de una guía de cara a la gestión de la EE por parte de las compañías navieras que les permitiese hacer un plan particularizado para cada buque dependiendo de su características. Este plan generaliza un ciclo de mejora basado en cuatro fases que son:

1. **Planificación:** donde el armador debe marcar el consumo energético del buque, que medidas toma para mejorar la EE y cual será la mejora prevista.
2. **Implantación:** es la puesta en marcha de las medidas junto con la indicación personal responsable de las mismas.
3. **Supervisión:** control cuantitativo de la EE mediante una herramienta establecida en el ámbito internacional recomendándose el uso de EEOI como indicador cuantitativo para el control.

4. **Autoevaluación y mejora:** es fundamental la evaluación de las medidas tomadas y su nivel de implantación sobre los datos cuantitativos así, se podrá mejorar el ciclo sobre una corrección o modificación de la planificación del siguiente ciclo.

Además de esta planificación se hacen consideraciones sobre la mejora de otros aspectos relacionados con la actividad de los buques como son:

1. **Operaciones con consumo eficiente:** enfocadas sobre el uso de combustible; con mejoras en los campos de la planificación de la ruta, consideraciones de mejora basada en las condiciones meteorológicas, selección de la velocidad eficiente u optimización de la potencia.
2. **Optimización del manejo del buque:** donde se juega con parámetros de asiento del buque, lastrado, mejoras del flujo al rededor del propulsor o hélice, consideraciones de mejora del timón y sistemas de control del rumbo como pilotos automáticos, mantenimiento del casco y limpieza.
3. **Sistema de propulsión:** mantenimiento del sistema de propulsión; recuperación del calor residual.
4. **Mejoras de la gestión de la flota:** mejoras del manejo de la carga.
5. **Gestión de la energía:** tipos de combustible.
6. **Otras medidas:** que se muestren favorables a la mejora.
7. **Compatibilidad de las medidas:** edad y vida de servicio operacional del buque; tipo de travesía y zona de navegación.

El sistema se establece como obligatorio para todo buque con un Tonelaje de Registro Bruto (TRB) mayor o igual a 400 TRB's que, deben disponer a bordo de su SEEMP con el aprobado de la administración nacional correspondiente [55]. Este SEEMP debe concentrar los siguientes elementos:

1. Información del buque con su nombre, tipo, arqueado bruto y capacidad.
2. Información del plan con su fecha de emisión, el periodo de implantación del mismo, responsable de su elaboración, el de su implantación y la fecha prevista de la siguiente evaluación.
3. Medidas de EE tomadas, la fecha de comienzo de su adopción y el personal responsable de las mismas.
4. Descripción de los instrumentos de vigilancia.
5. Objetivos del plan cuantificables.
6. Procedimientos de evaluación del sistema.

### 2.6.3. El EEOI

El EEOI de operación [56] es la herramienta voluntaria y complementaria del SEEMP creada por la IMO que mide el consumo eficiente del buque. De forma cuantitativa arroja valores de toneladas de  $CO_2$  sobre toneladas de carga por milla navegada ( $TnCO_2/Tn_{carga} nm$ ). Su formulación responde a la ecuación 2.24

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{carga} \times D} \quad (2.24)$$

La ecuación 2.24 se puede referir a un periodo determinado que engloba varios viajes y así, obtenemos la relación 2.25

$$EEOI_{Average} = \frac{\sum_j \sum_i FC_{ij} \times C_{Fj}}{\sum_i m_{carga} \times D_i} \quad (2.25)$$

Donde:

$j$ : es el tipo de combustible empleado en la navegación.

$i$ : el número de viaje al que corresponde el consumo.

$FC_{ij}$ : masa de combustible  $j$  consumido en el viaje  $i$ .

$C_{Fj}$ : factor de conversión de la masa de combustible  $j$  en masa de  $CO_2$ .

$m_{carga i}$ : carga que transporta en  $Tn$  o trabajo realizado en número de contenedores en unidades Twenty foot Equivalent Unit (TEU) o número de pasajeros en el viaje  $i$ .

$D_i$ : distancia recorrida en el viaje  $i$  en millas náuticas ( $nm$ ).

El factor de conversión  $CO_2$  es función del tipo de combustible y se encuentra tabulado como se puede ver en el cuadro 2.4 para los más empleados en el sector. Su

Combustible	Referencia	Carbono	$CF \left( \frac{TnCO_2}{Tn_{fuel}} \right)$
Diésel	ISO 8217 grado DMX a DMC	0,875	3,206000
Gasolina (LFO)	ISO 8217 grado RMA a RMD	0,86	3,151040
Gasolina (HFO)	ISO 8217 grado RME a RMK	0,85	3,114400
LPG	Propano	0,819	3,000000
	Butano	0,827	3,030000
LNG	-	0,75	2,750000

Cuadro 2.4: Coeficientes de conversión a  $CO_2$ . OMI CIRC. 684 (2018)

aplicación en buques de guerra se analizó en 2017 y 2019, demostrándose su validez incluyendo pequeñas modificaciones en relación a las unidades tomadas dependiendo de la clase de buque que se considere [57] [58] contemplándose sus posibilidades de implantación en la Armada y lo beneficioso en términos de ahorro energético de su aplicación desde la elaboración de un plan tipo SEEMP para esta.

En el cuadro 2.4 los acrónimos hacen referencia al fuel ligero (Light Fuel Oil (LFO)), fuel pesado (Heavy Fuel Oil (HFO)), gas licuado del petróleo (Liquefied Petroleum

Gas (LPG)), gas natural licuado (Liquefied Natural Gas (LNG)) y el factor de conversión (Correction Factor (CF)) en  $(Tn CO_2/Tn_{fuel})$ . Esta unidad variará dependiendo del elemento que consideremos para cuantificar la masa y dependiendo de la actividad emplearemos  $(CO_2/Tn \cdot nm)$ ,  $(CO_2/TEU \cdot nm)$  ó  $(CO_2/pasajero \cdot nm)$ . En las unidades anteriores  $Tn$  son Toneladas,  $nm$  millas nauticas, y  $TEU$  es unidad de medida de contenedores del inglés “Twenty-foot Equivalent Unit” (TEU) que es un contenedor de 20 pies de longitud normalizado. En el cuadro 2.5 podemos ver que unidades empleamos para cada uno de ellos. Este parámetro es importante ya que

Tipo de buque	Unidad de $m_{carga}$
Buques carga a granel	Número de contenedores o toneladas métricas de la masa total del cargo de los contenedores
Buques cisternas	Número de contenedores o toneladas métricas de la masa total del cargo de los contenedores
Gaseros	Número de contenedores o toneladas métricas de la masa total del cargo de los contenedores
Buques carga roda	Número de contenedores o toneladas métricas de la masa total del cargo de los contenedores
Buques portacontenedores	Una masa TEU de 10 toneladas que combine la masa total del cargo y los contenedores
Buques de contenedores y otras cargas	Una masa TEU de 10 toneladas que combine la masa total del cargo y los contenedores
Buques de pasaje, rodada y general	Número de pasajeros o las toneladas de registro bruto del buque
Buques de transporte de vehículos	Número de coches o los metros de carriles ocupados
Buques especiales de carga rodada	Número de camiones o metros de raíles ocupados

Cuadro 2.5: Unidades de masa según tipo. Elaboración propia (2018)

la Organización Marítima Internacional (OMI) ofrece flexibilidad a la hora de emplear la unidad de masa transportada lo que fue uno de los elementos que llevo a plantear su aplicación en los trabajos referidos con anterioridad aplicados a buques de guerra.

#### 2.6.4. El SNV

Es en 2014 cuando la UE, dentro del marco de políticas de clima y energía en el horizonte 2030, se marca como meta la reducción de las emisiones de GEI en un 40% tomando como niveles de referencia los correspondientes al año 1990 ya que, ve poco satisfactorias las medidas como el EEDI y el SEEMP para poder reducir el efecto invernadero de la atmósfera y decide establecer normativas más restrictivas desde sus reglamentos [50].

El sistema SNV nace en 2015 para el control de las emisiones de  $CO_2$  sobre la base

de consumo de los buques mercantes y constituyen, un primer elemento en el sector marítimo para la reducción de gases de efecto invernadero. La toma de datos desde el SNV se hace por la falta de información fiable existente para, con el conocimiento del combustible consumido y emisiones de  $CO_2$  implantar medidas de mejora en EE limitando las emisiones de los buques.

Se esperan reducir las emisiones en un 2% y ahorrar hasta 1.200 millones de dólares en el sector hasta 2030 además, de suponer un paso imprescindible para poder llevar a cabo nuevas medidas de mejora de la EE sobre la base de datos fiables que permitan fijar objetivos de reducción de consumo, emisiones y mayor rentabilidad. Tendrá en cuenta todos los viajes de los buques dentro de los límites de la Unión, los de salida de puertos del exterior y con fin en los puertos de la Unión incluyendo la información de emisiones de  $CO_2$  en los tránsitos a puertos exteriores y las emisiones en puerto.

Su aplicación será obligatoria en buques con tonelaje de registro bruto (*TRB*) superior a 5.000 Tn. Los buques con *TRB* superior a 5.000 Tn son el 55% de los buques con escala en puertos de la UE con responsabilidad en las emisiones del 90% del total. Estas magnitudes garantizan que con la aplicación del SNV se asegure la reducción de las emisiones de forma satisfactoria.

El reglamento deja exentos los buques de guerra, auxiliares y pesqueros, buques factoría, los de madera de construcción primitiva, y los que no emplean combustibles no renovables ni buques de propiedad estatal no comerciales. El SNV puede aplicarse de cuatro formas distintas:

1. Uso de notas de entrega de combustible.
2. El control a bordo de niveles en los tanques de combustible.
3. Los indicadores de caudal para los procesos de combustión.
4. Las mediciones directas de las emisiones.

Esta información tendrá carácter anual por buque y se publicarán las medias anuales de consumo de combustible, emisiones de  $CO_2$  y de eficiencia de los buques. Se llevará a cabo una verificación del plan de seguimiento con verificadores acreditados que expedirán un documento de conformidad del cumplimiento de las obligaciones de la UE. Las medidas coercitivas por incumplimiento pasan por sanciones y, pueden llevar a la expulsión del buque de puertos de la Unión Europea. El reglamento está en vigor desde 1 de julio de 2015 con aplicación efectiva previa al 1 de enero de 2018 que se corresponde con el primer periodo de notificación.

### 2.6.5. El SRDCCB

Esta normativa será de aplicación obligatoria para buques con arqueo bruto igual o superior a 5.000 Toneladas de arqueo, equivalente cada una a un volumen de 100 pies cúbicos o  $2,83 m^3$  desde enero de 2019 que deberá incluirse en el SEEMP del buque. Nace en 2016 tras la reunión del MEPC 70 para implantar un sistema de registro y notificación del consumo de combustible que sigue la línea de la UE con su SNV.

El país de abanderamiento del buque deberá recibir los datos del buque a fin de año y serán recopilados en una base de datos de la IMO con lo que se elaborará informe

dirigido a esta misma institución.

Es una normativa en desarrollo que contiene:

1. Directrices para los procedimientos de verificación de datos de la Administración.
2. Directrices para la elaboración y la gestión de la base de datos de la IMO sobre el consumo de fuel-oil de los buques.
3. Circulares MEPC para abordar el caso de los buques de Estados que no sean Partes y alimenten dicha base de datos.

Estos registros no son de aplicación a buques de guerra como en el caso de las anteriormente explicadas. De forma resumida podemos ver en la figura 2.11 la estructura de esta legislación emitida por las distintas organizaciones y explicada en la sección 2.6; vemos que la de IMO aplicará para el buque de nueva construcción con el EEDI, para los buques en servicio el SEEMP con el empleo de la herramienta del EEOI para todos los buques y desde la Unión Europea con el SNV directamente relacionado con el SRDCCB.

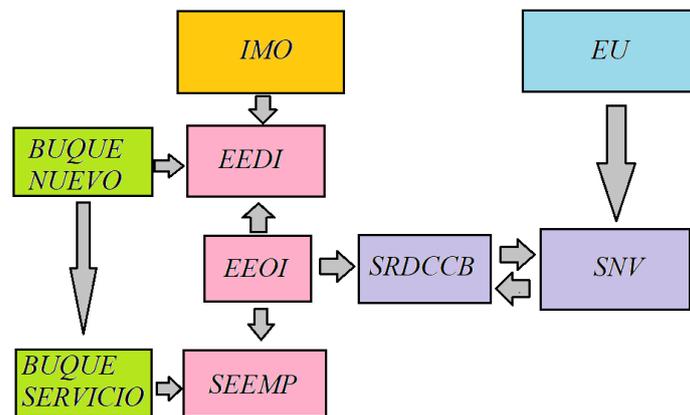


Figura 2.11: Reglamentación en EE. Elaboración propia (2018)

## 2.7. Técnicas y tecnologías para la mejora de la EE

Existen estudios de mejora de la EE en buques civiles relacionados con las distintas partes del buque, desde su estructura y sus formas para reducir el arrastre de agua hasta otros sistemas como los de distribución eléctrica, propulsión, recuperación de calor, empleo de bancos de baterías o el uso de tecnologías TIC [59], elementos del entorno del “bigdata” y modelizado informático para su manejo y explotación. Todas las mejoras que se han estado implantando en los últimos años las podemos encuadrar en tres grupos fundamentales:

- **Mejoras en el diseño del buque:** optimizando sus formas, la hidrodinámica y los materiales de construcción como hitos importantes.

- **Tecnologías aplicadas a los sistemas embarcados:** como pueden ser las mejoras de los motores propulsores o los sistemas de generación eléctrica o auxiliares entre otros.
- **Eficiencia en el consumo de combustible:** en este grupo se pueden considerar medidas como las orientadas a la creación de un SEEMP para el buque, las de gestión de la energía a bordo en base a parámetros cuantitativos u otras acciones orientadas a controlar las condiciones de mantenimiento de elementos tales como la hélice.

De forma más detallada desglosaremos a continuación cada uno de estos grandes grupos de medidas basándonos en estudios de las sociedades de clasificación en esta materia y literatura que desarrolla estudios de mejora de la EE en buques [60][61][62].

### 2.7.1. Mejoras en el diseño del buque

La optimización de las formas y la hidrodinámica puede ser un elemento de mejora de la EE de la carena que repercutirá en un menor coste del ciclo de vida del buque. Estas las podemos ver de forma resumida en el cuadro 2.6:

- **Relación tamaño capacidad:** aumentar el tamaño del buque puede resultar en el ahorro de combustible de forma considerable, así pasar de una capacidad en un portacontenedores de 4.500 TEU a 8.000 TEU pueden repercutir en un ahorro del 25% del consumo y un paso de 8.000 TEU a 12.500 TEU puede reducir este en un 10%; el coste estimado por TEU se puede reducir hasta un 15% en un buque de 4.500 a 8.000 TEU.
- **Velocidad de servicio:** el estudio de la velocidad puede repercutir también en el comportamiento más eficiente así, reducir un nudo puede suponer un ahorro para un portacontenedores de entre el 12 y el 15% y en un petrolero del 17 al 22%. Si reducimos el tamaño de la máquina para operar a la velocidad económica reduciremos el coste final del buque.
- **Dimensiones principales:** analizar las relaciones entre las dimensiones principales del buque puede ser otra vía para mejorar la EE. si por ejemplo aumentamos la relación eslora manga ( $L/B$ ) o actuamos solo en la eslora ( $L$ ) aumentando esta bajando el coeficiente de bloque ( $C_b$ ) podremos reducir el consumo de combustible entre un 3 y 5%; esta medida es aplicable a cualquier tipo de buque, el coste de estas medidas aumenta el coste final del buque entre un 0,5 y un 1% pero puede compensar por el ahorro en combustible en el ciclo de vida. En el diseño de las líneas del casco también se analizan los cumplimientos normativos buscando, por ejemplo, obtener el conjunto de parámetros de diseño que minimicen el EEDI en los buques de nueva construcción. Una forma de obtener esto es con la reducción de la resistencia con pequeñas reducciones en el volumen de la carena modificando las formas [63].
- **Reducción de la resistencia de la carena  $R$ :** esto se puede hacer optimizando las formas y empleando elementos como bulbos de proa. La reducción en consumo se estima entre el 5-8% el estudio de American Bureau of Shipping

(ABS) estima que el coste de un modelado puede ser de 200.000 y 500.000 dólares (año 2013). Esta medida puede ser factible para cualquier tipo de buque. Estudios publicados sobre la mejora de la plataforma y su comportamiento hidrodinámico en el agua reduciendo el arrastre permitirá mejorar la EE del sistema completo; tradicionalmente se venían empleando series sistematizadas de interpolación en 2 dimensiones como la conocida “Serie-60” que, con la mejora de los sistemas informáticos, pueden ser optimizados sus resultados de forma notable empleando modelizados en 3-D de las secciones obteniendo mejoras del 10,65% con respecto al mismo buque diseñado con la serie sistemática mencionada [64].

- **Sistemas de mejora del propulsor:** la reducción potencial de consumo está entre el 0-5% recomendado para buques de media y baja velocidad los elementos que se implanten tales como el coste de la medida puede ser medio a bajo sobre el coste total de la unidad. Generalmente el propulsor se analiza conjuntamente al timón desde que se mejoraron los medios de simulación con modelos de fluidos (Computational Fluid Dynamics (CFD)). Las posibles mejoras en el diseño de la hélice y modificadores de las formas de los miembros como aletas o conductos de propulsores [65].
- **Elementos situados por proa del propulsor:** elementos como aletas y estatores situados antes de que la hélice rompa el flujo laminar creando el torbellino por popa que permitan redireccionar el flujo antes de la entrada en el propulsor para mejorar el rendimiento del mismo. Se pueden alcanzar ahorros en combustible del 2-6% y requieren de un estudio integrado del propulsor y estos elementos el coste es medio bajo pero el principal problema que presentan es el de mantenimiento.
- **Elementos situados por popa del propulsor:** se alcanza un ahorro en combustibles de entre el 2-6% como en el caso anterior. Estos elementos se sitúan aguas abajo de la hélice cuando se ha creado el torbellino por su movimiento, de igual forma requieren de un estudio integrado con el propulsor para optimizar el diseño mejorando el rendimiento del conjunto [66] [67].
- **Hélices de alto rendimiento:** pueden ofrecer ahorros del 3-10% y esta medida será de aplicación a buques dependiendo del perfil de operación del buque, los regímenes de máquina, los viajes que hace, los estados de carga etc [68].
- **Textura de la superficie de la carena:** los tratamientos superficiales para mejorar el régimen laminar del fluido sobre el casco, y los anti-incrustantes (“anti-fouling”) para evitar la proliferación de organismos marinos adheridos al casco es otro elemento de mejora de la EE. La evolución producida en los últimos años en nano-composites ha permitido obtener pinturas ecológicas, económicas y eficientes [69]. Se considera que se puede ahorrar del 5-10% de combustibles es aplicable a cualquier tipo de buque. Es un campo poco estudiado y el coste de mantenimiento es la clave de su coste. La limpieza de la superficie determina la eficiencia [70].
- **Energía eólica:** el viento es una energía que puede ser aprovechada para reducir el consumo del buque, se han calculado ahorros hasta del 30% del consumo del buque[57]. Elementos como las velas rígidas empleadas en algunos

cargueros[71], cometas despletables y los rotores Fletner son algunos de estos elementos [72]. Los principales problemas de estos elementos es su coste de mantenimiento, y su rendimiento depende de la cantidad de viento que tengamos en cada momento.

- **Energía solar:** la energía solar es la otra energía alternativa, su uso es muy limitado reduciéndose fundamentalmente a su aplicación en buques pequeños. Su desarrollo futuro necesita acumuladores mejores y sistemas de propulsión que permitan mayores velocidades [61].
- **Compatibilización:** no es más que la integración de algunas de las medidas anteriores si bien, debemos tener presente que todas no pueden implantarse a un tiempo ya que algunas son incompatibles con otras al afectar a parámetros de funcionamiento vitales para las mismas. Es necesario hacer un análisis de interferencias que no mermen las medidas tomadas.

Acción	Consumo %	Aplicable	Coste
Tamaño / Capacidad	↓ 15 – 25 %	Todo buque	↓ 15%TEU
Velocidad de servicio	↓ 12 – 22 %	Todo buque	Variable
Dimensiones principales	↓ 3 – 5 %	Todo buque	↑ 0,5 – 1 %
Reducción de R del casco	↓ 5 – 8 %	Todo buque	Medio
Mejoras en el propulsor	↓ 0 – 5 %	Baja y media v	Bajo
Elementos situados por proa del propulsor	↓ 2 – 6 %	Todo buque	Medio/bajo
Elementos situados por popa del propulsor	↓ 2 – 6 %	Todo buque	Medio/bajo
Hélices de alto rendimiento	↓ 3 – 10 %	Todo buque	Medio/bajo
Texturizado del casco	↓ 2 – 6 %	Todo buque	Medio/bajo
Energía eólica	↓ 30 %	Buques lentos	Medio/bajo
Energía solar	Marginal	Limitada	Medio/bajo
Compatibilización de medidas	Variable	Todo buque	Medio

Cuadro 2.6: Acciones sobre el diseño. Elaboración propia (2018)

Una segunda parte de medidas las tenemos con el empleo de Aceros de Alta Resistencia (HTS), materiales compuestos y aleaciones no férricas ligeras como aluminio (cuadro 2.7). Emplear aceros de alta resistencia permite ahorro de peso y, por ejemplo, usar un 10% del acero tipo HTS en lugar de aceros normales puede permitir reducir el peso total del buque en 1,5 - al 2% y produce mejoras del 0,2-0,3% de carga útil o “Payload” con una reducción del consumo de 0,2-0,5%. El uso de materiales ligeros no férricos puede llegar a ahorrar del 30 - 70% del peso de la misma estructura construida en acero. El problema es el coste de producción que puede hacer inviable su construcción por encarecer mucho el producto [61]. La figura 2.12

Acción	Consumo %	Aplicable	Coste
Empleo de aceros de alta resistencia (HTS)	↓ 0,2 – 0,5 %	Todo buque	Medio
Empleo de composites y aleaciones no férricas	Alto	Todo buque	Alto

Cuadro 2.7: Uso de acero HTS y materiales ligeros. Elaboración propia (2018)

muestra una curva elaborada con los datos del documento del ABS en el que podemos ver que el empleo de acero de alta resistencia puede llegar a un ahorro del 12,5 % si elaboramos toda la estructura con acero de este tipo. Dependiendo del tipo

de buque un uso de un 1 % de acero HTS puede reducir el peso entre 50 y 471 Tn en un buque de 12.500 TEU; la figura muestra ahorros con un 20% de acero HTS de algo más del 6 % del peso en estructura. Puede ser muy aconsejable en la elaboración de refuerzos transversales tipo mamparo. El uso de los aceros de alta resistencia no es nuevo en construcción naval, comenzó a usarse en cubiertas y luego se fue extendiendo su uso al resto de elementos de la topología estructural del buque [73] al comprobarse que las reducciones de peso frente al coste de material favorecían la rentabilidad por la reducción de peso del buque y el consecuente aumento de la carga útil y la reducción de la potencia de la máquina necesaria para mover el buque a una velocidad económica.

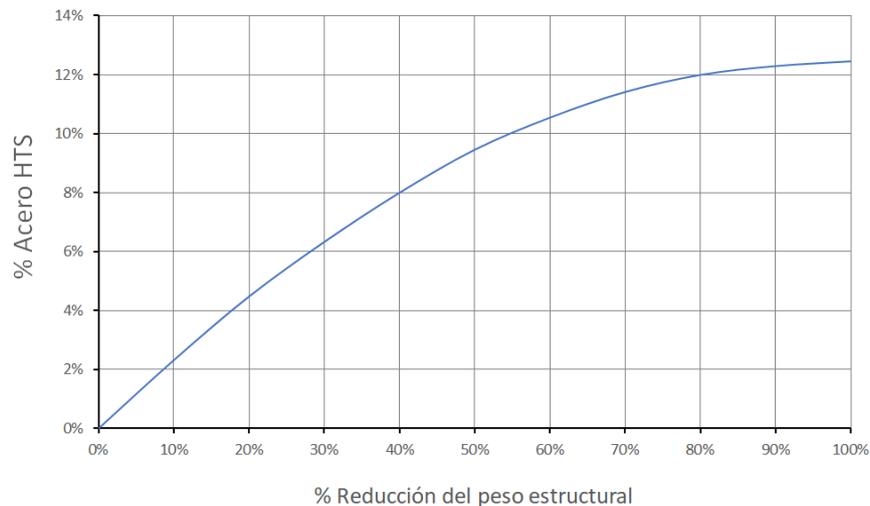


Figura 2.12: Reducción peso empleando HTS. Elaboración con datos de ABS (2013)

El uso de aleaciones ligeras o materiales compuestos se hace de forma profusa en embarcaciones pequeñas de tipo deportivo, embarcaciones de pesca costera y auxiliares de actividades portuarias como embarcaciones de practicaje o de limpieza. El ahorro que se produce en peso es elevado y dependerá de la densidad de los materiales usados.

### 2.7.2. Mejoras aplicadas a los sistemas embarcados

Dentro de este campo se puede actuar sobre múltiples elementos en el buque, desde la propulsión hasta los sistemas auxiliares están sujetos a mejora. Es evidente que instalando equipos nuevos la eficiencia será la mejor pues ya se diseñan muchos pensando en esta, de todas formas en ocasiones su funcionamiento se puede ver afectado por el funcionamiento en conjunto con el sistema buque y, los parámetros de fabricante, pueden no darse de forma satisfactoria por ello, es aconsejable acometer alguna de las mejoras siguientes que presentamos, como en apartados anteriores, de forma resumida en el cuadro 2.8:

- Instrumentación de la propulsión: en principio no se puede cuantificar el ahorro o reducción que puede tener pues, esta medida, se dirige a disponer de

datos de la máquina propulsora que permitan conocer el comportamiento de la misma para poder implantar medidas que favorezcan la reducción del consumo por medio del análisis de los datos. su coste puede oscilar ente 20.000 y 50.000 \$ (2013) para hacer el control y mediciones de potencias y caudales con flotametros.

- **Monitorización de parámetros del motor:** en motores lentos favorece el ahorro de combustible entre un 1 y un 2%, es aplicable a todo tipo de buques existen distintas empresas que han desarrollado sistemas para este tipo de motores como MAN con su CoCoS o Wärtsila con el ICC. El coste de estos sistemas puede oscilar entre 5.000 y 50.000\$ dependiendo de si se instalan elementos portátiles o fijos [61].
- **Recuperación de calor:** estos sistemas no son de ahora, pero si se ha visto una aplicación más beneficiosa para la mejora del rendimiento del combustible desde parámetros de EE. Existen distintos sistemas de recuperacion de calor o “Waste Heat Recovery” (WHR) que dependerán del tipo de planta propulsora y de la finalidad que queremos darle [74]. Hay que tener presente que el 50% de la energía suministrada se pierde en forma de calor residual así pues, estos sistemas son de gran interés para mejorar la EE [75]. Estos sistemas presenta la gran ventaja que no producen gasto de combustible, no emiten GEI en su funcionamiento y existen múltiples estudios de mejora de los mismos empleando herramientas matemáticas y modelado [76].
- **Sistemas de climatización:** si bien es un sistema auxiliar, lo tratamos de forma separada por ser un elemento muy variable en consumo y que se puede convertir en un elemento fundamental para su estudio. No todos los buque tienen las misma demanda de climatización y esta debe ser estudiada de forma pormenorizada pues en caso como buques de pasaje o de investigación puede ser de vital importancia por su consumo [77].
- **Sistemas auxiliares:** dentro de este apartado se encuentran los sistemas de generación de energía a bordo, ya sea para la propulsión como para el consumo de los distintos equipos instalados en el buque como ya hemos visto en la sección 2.2.2. Dependiendo del tipo de planta las medidas de mejora de la eficiencia se orientaran en uno u otro sentido, por ejemplo, los buques con propulsión diésel pueden orientarse a la propulsión híbrida o intercalar elementos de cogeneración para aumentar el rendimiento del combustible. Algunas de estas mejoras las podemos encontrar en los sistemas de distribución de energía eléctrica en base al uso de centros de carga separados que permiten mayor eficiencia manteniendo a régimen los motores destinados a la generación y, en caso de avería, en alguna línea permiten emplear otro centro de carga diferente [78]. Tradicionalmente se empleaban distribuciones en árbol con una única línea de suministro y un único centro de distribución o cuadro principal. Este concepto es el empleado en buques de guerra modernos desde hace tiempo. El uso de generadores de cola para reducir el numero de consumidores de combustible es otra medida que se puede implantar.
- **Cogeneración:** Generación de electricidad o propulsión a raíz de la recuperación del calor de gases bien para calentar con ellos directamente agua emplea-

da como agua sanitaria para las tripulaciones o para la generación de vapor que pueda mover otro tipo de equipos como turbogeneradores.

Acción	Consumo %	Aplicable	Coste
Instrumentación de la propulsión	Monitorizar	Todo buque	20K - 50K\$
Motores principales	↓ 1 – 2%	Todo buque	5K - 50K\$
Recuperación de calor residual	Variable	Todo buque	Medio
Aire acondicionado HVAC	Variable	Todo buque	Medio
Resto de sistemas auxiliares	Variable	Todo buque	Medio

Cuadro 2.8: Medidas de mejora de sistemas. Elaboración propia (2018)

### 2.7.3. Mejoras en el uso de los combustibles

Las metodologías fundamentales en el campo de los combustibles se puede agrupar en la mejora de la EE de forma pasiva con la instalación de equipos con bajo consumo como puede ser la sustitución del alumbrado incandescente por luces de otro tipo como las LED y medidas activas sobre el uso de la energía como puede ser la búsqueda de la velocidad más económica, el control meteorológico o la recuperación de calor. Estas mejoras son las que explicamos en este apartado y resumimos en el cuadro 2.9.

El uso de combustibles más eficientes permite reducir el consumo de este. Hay que tener presente que, por ejemplo, en el caso de los combustibles fósiles el LNG puede generar por 1 kg 12,53 Kilovatio hora (kWh), el fuelóleo 11,08 kWh y Gasolina 12,19 kWh. Vemos que el LNG es una opción interesante para reducir las emisiones de  $CO_2$  en buques con propulsión tradicional que emplean fuel [79] ya que su rendimiento es mayor. El uso de este gas como combustible requerirá de nuevos sistemas de distribución ya que no todos los puertos poseen instalaciones para el suministro del mismo. Un inconveniente es el espacio necesario para almacenarlo en el buque. Existen combustibles de nueva generación que permiten sistemas más sostenibles como son los bio-diésel más respetuosos con el medio ambiente por ser menos contaminantes [80].

Otro elemento químico que debe reducirse al máximo es el contenido en azufre (S) que es el responsable de las lluvias ácidas junto al  $NO_x$  por formación de dióxido de azufre ( $SO_2$ ) de su recombinación con el agua en suspensión en la atmósfera forman ácidos muy perjudiciales para el medioambiente.

#### Mejoras en el manejo del buque y su mantenimiento

Estas hacen que en la explotación del buque se mejore la EE. Las principales actuaciones que podemos llevar a cabo son las que podemos ver en la tabla 2.9 de forma resumida son:

- Trimado y lastrado: optimizar estos según calado y velocidad para reducir la resistencia en la navegación  $R$  de la que ya hablamos en la fase de diseño. El buque en su fase de operación sufrirá variaciones en sus calados no contempladas durante el diseño que deberán ser corregidas para mejorar la EE, para ello hace falta sistemas dinámicos de medición que puedan variar estos calados de forma inmediata en tiempo real.

- Timón y gobierno automático: reducir la distancia navegada fuera de ruta, empleando al mínimo el timón para reducir la resistencia y el consumo; los buques pueden tender a desviarse de su ruta óptima navegando una mayor distancia que la deseada, para ello es fundamental tener presente el uso de pilotos automáticos y Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System (GPS)), que permitan optimizar la ruta. Este ahorro es mayor en rutas largas por lo que los buques con travesías oceánicas deben emplear estos sistemas.
- Mantenimiento del casco: mediante el uso de sistemas de recubrimiento, mejor planeamiento de intervalos de limpieza e inspección submarina como los ya comentados anteriormente buscando los momentos más adecuados para efectuar estos mantenimientos.
- Organización de la flota: optimizar el uso de los buques de la flota para mejorar la rentabilidad de su uso.
- Manejo de la carga: adaptar la carga dependiendo de puertos y buque.
- Otras medidas: mejoras en la iluminación uso de energías renovables o modernización de sistemas para hacerlos más eficientes.

Veremos a continuación elementos relacionados con estas mejoras y los resultados obtenidos en distintos estudios que buscan la mejora de la EE.

### **Reducción de las emisiones**

Un barco que mejora significativamente su EE permite que su contribución a la contaminación del medio ambiente sea menor, si esto lo extrapolamos a toda la flota internacional podremos obtener resultados que reduzcan significativamente la contaminación total. Así y todo, el transporte marítimo internacional no es el único responsable de la contaminación ambiental y las emisiones de GEI, pues representa entre el 2,7 al 3% de las emisiones globales de  $CO_2$  [81]. La reducción de las emisiones es un elemento fundamental a la hora de abordar el cambio climático.

Existen estudios que buscan, con la aplicación de sistemas de baterías, reducir las emisiones de  $CO_2$  cuando los buques se encuentran en puerto, lo que requiere de un conocimiento muy exacto de consumos del buque en puerto [82]. Este extremo es interesante para buques de guerra por los largos periodos de tiempo que pasan en puerto durante su ciclo de vida eliminando riesgos ambientales y para la salud.

Dentro de la protección de la salud es importante conocer entre otras las emisiones de  $NO_x$  que los buques producen y, en este sentido, es importante conocer los datos que ofrecen algunos estudios en los que la evaluación de estos gases nocivos para la salud, durante las actividades de maniobra de los buques, permite conocer cuanto más contaminante es el buque dependiendo de la situación en la que se encuentre de maniobra [83], parámetros como la variación del calado o el ángulo de timón con el que se hagan las maniobras influirán en la producción de gases nocivos.

Otros estudios han demostrado el efecto perjudicial del transporte marítimo a nivel global y así, los residuos generados por los buques que deben ser descargados en puerto o arrojados al mar, la producción de ruidos submarinos que afecta a la fauna

marina, las emisiones de gases que se hacen a lo largo y ancho de los mares y la concentración de estos contaminantes en los puertos y zonas costeras se presenta como algunos de los problemas más significativos de este tipo de actividad [84].

### Mejoras en la operación

Existen estudios que han demostrado que el análisis de operación del buque en cuanto a consumo durante su vida útil difiere bastante de los cálculos que se emplean durante su diseño para estimar su consumo energético así, con el empleo de sistemas de recuperación de calor, se puede llegar a ahorros anuales en el consumo del 7% al 9% [85].

Por otro lado estudios de las rutas seguidas por los buques han dado como resultado la aparición de ecuaciones y algoritmos dinámicos de aplicación en el entorno de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para optimizar las navegaciones oceánicas sin obligarnos a ajustar a los círculos máximos empleados tradicionalmente en navegación y reducir el coste de las mismas mejorando la EE teniendo presente elementos como las condiciones de viento y mar existentes en cada momento [86].

No solo los buques se analizan para mejorar la EE, también son objeto de estudio los puertos entre los que operan, obtener puertos eficientes mejorará la rentabilidad de los mismos y la sostenibilidad de su actividad aplicando filosofías como las “Lean” en las que prima el cuidado ambiental, la sostenibilidad y la EE [87].

Acción	Consumo %	Aplicable	Coste
Optimización de la ruta	↓ 10% $v \Rightarrow$ ↓ 20%	Todo buque	Variable
Variabes climáticas	Área de operación	Todo buque	Variable
Trimado / Calado	↓ 1 – 2%	Todo buque	50K – 100K\$
Piloto automático	↓ 1%	rutas largas	20K\$
Tratamientos superficiales	↓ 3 – 4%	Todo buque	10\$/ $m_2$
Limpieza del casco	↓ 7 – 9%	Todo buque	1,5\$/ $m_2$
Rugosidad de la hélice	6%	Casco limpio	3K – 6K\$

Cuadro 2.9: Medidas de reducción del consumo. Elaboración propia (2018)

#### 2.7.4. Mejoras y estudios en EE de las marinas de guerra

En el caso de los buques de guerra es a finales del siglo XX cuando empiezan a aparecer estudios de cierta entidad que buscan la obtención de buques completamente eléctricos para mejorar la eficiencia del sistema [88] [89] y con ello mejorar la EE. Las fuerzas armadas de los EE.UU. articularon la EE sobre una política que tuviese esta como un aspecto principal de la transformación militar y favorecer el ahorro con estudios de revisión de diseños [90] y de aplicación en acciones técnicas de reducción del consumo [91]. Las razones fundamentales para implantar tales políticas son [92]:

1. La EE es primordial para desarrollar una fuerza expedicionaria, ágil, efectiva y sostenible.
2. La dependencia de la energía debe reducirse para dar forma al futuro entorno de seguridad a nuestro favor.

3. Se buscará el ahorro derivado de la EE para capitalizar y transformar la fuerza y no mermar las capacidades futuras. Limitar los requisitos de apoyo logístico mejora la capacidad de combate y reduce los costos.
4. Los Servicios, las unidades, los laboratorios de investigación y otras organizaciones del Departamento de Defensa deberían poder mantener un sistema escalonado de actuaciones a nivel científico tecnológico como parte de los ahorros de iniciativas innovadoras en material, procedimientos y doctrina que mejoren significativamente la EE.
5. Se requiere la adaptación rápida de nuevas tecnologías energéticas para el uso civil, para la seguridad física y económica a largo plazo.
6. La EE no afectará negativamente la capacidad militar en ningún caso.

Estas consideraciones generales son las seguidas, con matices evidentes por las situación particular de cada nación, por otras marinas occidentales como la Royal Navy, la Marina Italiana o las marinas de Australia, Canadá y la propia Armada Española [93]. En el año 2006 el Departamento de Defensa de los EE.UU. publica un informe sobre la mejora de la EE en buques de guerra y las instalaciones en base a la reducción del consumo [91]. El estudio establece una serie de elementos como los arriba relacionados para la reducción efectiva del consumo en los buques de la marina de los EE.UU. analizando la potencialidad de las mejoras tecnológicas. Será en 2011 cuando se acuñe el termino “Great Green Fleet” [94] que busca comprobar como se pueden hacer despliegues de buques en términos de EE y contrastar que no se merman las capacidades de la fuerza y las alternativas existentes a los combustibles tradicionalmente empleados en los buques de guerra.

En el caso de la UE la Directiva 2012/27/UE obliga a mejorar las condiciones de gestión energética para favorecer el ahorro en toda la Unión. En su capítulo segundo habla sobre la necesidad de adoptar planes que se elaboraron antes del 30 de abril de 2014 y los cuales deben ser renovados con carácter anual. En España, esto se ha concretado en el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PNEE). La Directiva 2012/27/UE en su artículo cinco habla de “Función ejemplarizante de los edificios de los organismos públicos”, estableciendo una serie de requisitos especiales para estos, pero deja al criterio de los países miembros el aplicar estas políticas a las instalaciones pertenecientes a las Fuerzas Armadas (Cap. II, p.2), pero no así a los contratos que puedan realizar estas siempre y cuando no entren en conflicto con las exigencias de seguridad propias de las misiones encomendadas. Esto queda también reflejado en el plan nacional de acción de eficiencia energética PNAEE establecido para el periodo 2014 a 2020 el cual, recoge el inventariado de las instalaciones militares y recintos dependientes del Ministerio de Defensa (MINISDEF), en un registro propio y para los cuales se establecen programas de actuación y de mejora específicos en su punto 4.3.1.

De igual forma, La Directiva 2012/27/UE y el PNAEE, marca directrices para instalaciones públicas, edificios, transporte, buques de pesca o actividades agrarias, pero no hace referencia alguna a buques de guerra o, a las medidas que sobre estos se puedan tomar. Para ellos no existen planes específicos que estudien su eficiencia energética, ni de forma integral ni para sus sistemas o subsistemas en particular.

En abril de 2013 la Armada celebró en Madrid las primeras “Jornadas de eficiencia

energética y medioambiente en la Armada para el siglo XXI” en las cuales se manifestó el compromiso y la necesidad de potenciar la eficiencia energética en general y potenciar el empleo de las energías renovables como compromiso institucional con el ahorro energético, la sostenibilidad y el cuidado medioambiental.

## 2.8. Herramientas matemáticas para la EE

Atendiendo a las herramientas que se están empleando en los estudios de EE, en los últimos tiempos se vienen aplicando métodos de análisis y decisión multicriterio, Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) de forma profusa, generándose amplia bibliografía en la materia [95] [96] [97]. Estos métodos permiten actuar en múltiples áreas como son: la selección de combustibles, la optimización de las condiciones de operación o la evaluación del impacto medioambiental y control de emisiones de gases de efecto invernadero entre otros [98].

El uso de herramientas MCDA combinada con otros métodos como pueden ser los de matemática difusa o gris, Grey Relation Analysis (GRA) [99] que podemos traducir como métodos de estudio de relación difusa o dispersa son muy empleados en el análisis de sistemas de calefacción o refrigeración en instalaciones de tierra, con finalidades muy dispares unas de otras [100]. Estos métodos también se aplican a buques [101]. La literatura es amplia en herramientas de todo tipo para la aplicación en el campo de la EE desde las más sencillas como la preparación de gráficos de control y gestión [102], como estudios más complejos como estudios de aplicación de algoritmos de todo tipo y procedimientos estadísticos si bien las aplicaciones en el sector naval son mucho menos frecuentes que en el caso de la ingeniería civil y menos aun en el campo de los buques de guerra.

De todas formas generalmente cuando analizamos variables energéticas para su control en busca de mejoras en la EE tenemos que recurrir a las tradicionales herramientas estadísticas que suponen un primer paso antes de aplicar uno u otro método de análisis [103] [104] [105] [106] así, trataremos en los apartados siguientes distintos elementos que se emplean en el campo de la EE que nos permitan ver los distintos métodos y técnicas que se emplean en la actualidad.

### 2.8.1. Matemática estadística

Esta es una rama de las matemáticas que partiendo de muestras limitadas se dedica a estudiar las poblaciones [107]. Dentro de la ciencia estadística aunaremos la estadística descriptiva, que emplea bases de datos como elemento de trabajo y que podemos denominar variables o atributos dependiendo si estamos haciendo referencia a un valor numérico como puede ser la temperatura o a una característica como puede ser el color de los ojos de una persona.

Las variables numéricas son variables que pueden ser discretas o continuas, las primeras no pueden tomar valores intermedios entre los del conjunto y las segundas sí. Un ejemplo del primero puede ser el número de enfermos en una epidemia y del segundo puede ser el ya mencionado rango de temperaturas de un local que queremos climatizar.

La estadística lleva inherentes dos procesos, uno descriptivo en el que organizamos, describimos, representamos y resumimos la información que los datos recolectados

nos aportan y otro de inferencia, es decir, orientada a la obtención de las conclusiones sobre la población total que estamos estudiando a partir de la muestra considerada.

### Definiciones básicas

Dentro de la estadística descriptiva debemos diferenciar los elementos básicos que empleamos para caracterizar el estudio así, es necesario definir los siguientes elementos:

- Población  $N$ : es el conjunto de todos los sujetos sobre los que queremos conocer cierta información relacionada con el fenómeno estudiado.
- Muestra  $n$ : consiste en el subconjunto de la población de la que queremos conocer cierta información.
- Sujeto: la unidad de la población que analizamos. (sujeto, familia, comunidad, país, buque, escuadrilla, flota, medios, calor o combustible consumido)
- Variable  $x$ : que representa la característica que se pretende estudiar y estas pueden ser independientes o dependientes si existe relación entre ellas. Estas variables pueden ser:
  - Cuantitativas: se representan con números y expresan cantidades de la variable y a su vez podemos distinguir:
    - Continuas: puede tomar cualquier valor real en  $R$  dentro del intervalo de validez como la humedad o la velocidad del viento en el caso de un buque.
    - Discretas: solo toma valores enteros de la variable dentro del intervalo de validez como puede ser alguna posición o modo como encendido o apagado pues no existen situaciones intermedias en este caso.
  - Cualitativas: medidas que no se pueden expresar en números como el sexo, el color del pelo o el nivel de ingresos y a su vez podemos distinguir:
    - Ordinal: que son los distintos valores dependiendo de una escala definida con, por ejemplo, muy bueno, bueno, regular) del tipo de las escalas de Likert que se emplean en sociología.
    - Nominal: como pueden ser la etnia o el sexo en el caso de las personas.
- Valor  $x_i$ : cuantifica la variable seleccionada en el estudio.
- Observación: que es el acto con el que medimos la variable considerada.
- Estadístico: valor cuantitativo que se obtiene de resumir los valores de la variable (por ejemplo la media) y son siempre estadísticos muestrales.

A estas primeras definiciones debemos añadir las siguientes que serán de vital importancia en el proceso del estudio estadístico desde el punto de vista descriptivo, así tenemos:

- **Parámetro muestral:** que lo obtenemos al aplicar al estadístico muestral a la inferencia.
- **Marco muestral:** compuesto por el conjunto existente de sujetos reales de los que disponemos para elegir la muestra  $n$ .
- **Unidad muestral:** cada una de las unidades correspondiente al marco muestral.
- **Muestreo:** es el proceso de selección de sujetos para obtener información sobre ellos que pueden ser de los siguientes tipos:
  - **Aleatorio:** son los conocidos muestreos que se hacen al azar que pueden ser:
    - **Simple:** donde se hace una selección aleatoria de sujetos al azar. En general poco empleada pues requiere de lista completa de sujetos o resultados.
    - **Sistemático:** es muy empleado para muestras grandes; se elige un sujeto al azar de la lista completa y a partir de este se escojen los siguientes dejando un intervalo de sujetos fijos. El tamaño de intervalo  $k$  se calcula dividiendo el tamaño de la población  $N$  por el tamaño de la muestra deseado  $n$  es decir,  $k = (N/n)$
    - **Etapas/conglomerados:** este es similar al anterior si bien se procede a dividir el conjunto total según un conglomerado como puede ser considerar zonas concretas, regiones determinadas etc.
  - **Pseudoaleatorio:** cuando no existe marco muestral o es difícil de constituir este. El tamaño de la muestra depende del criterio del investigador y podemos distinguir:
    - **Por áreas:** aleatoriedad espacial por áreas en las que se introduce un tamaño de las mismas.
    - **Por cuotas:** es el más utilizado (por ejemplo las elecciones) se asignan estratos y se marca una cuota para cada uno de los estratos definidos.
    - **Intencional:** es muy poco aleatorio ya que los investigadores determinan la muestra y su tamaño. Se emplea en estudios del que no se dispone de lista de población definida.
  - **No aleatorios:** en los que no interviene el azar.
    - **De bola de nieve:** que se emplean con poblaciones muy ocultas y poco conocidas en sociología como (inmigración ilegal, variables asociadas a otros sucesos etc.) fundamentalmente se emplea cuando no conocemos de forma clara las características de la población ni su realidad.
    - **subjetivo o de juicio:** se elijen los sujetos de forma razonada en función de objetivo perseguido.
- **Error aleatorio:** es un error inevitable. Se considera la imprecisión en la estimación de una variable al calcularse a partir de una muestra en lugar de partir de un conjunto de población.
- **Sesgo muestral:** es más peligroso que el anterior. Se produce la distorsión de la realidad que se introduce debida a la forma en la que se selecciona la muestra.

- Análisis unidimensional: se hace cuando estudiamos la variables una a una de forma independiente.
- Análisis bidimensional: se estudian dos variables al mismo tiempo en conjunto.
- Frecuencia: es el estadístico referido a la cantidad de veces que una variable toma un valor determinado.
  - Absoluta  $n_i$ : igual al número de veces en que la variable toma un determinado valor.
  - Relativa  $f_i$ : proporción de veces en que la variable toma ese determinado valor.
  - Absoluta acumulada  $N_i$ : es el número de veces que la variable toma un valor o valores determinados.
  - Relativa acumulada  $F_i$ : proporción de veces que la variable toma un valor o valores determinados.
  - Porcentual  $(p_i)(P_i)$ : son las acumuladas expresadas en %.

Variable X	Frecuencias absolutas		Frecuencias relativas	
	Valor $x_i$	$n_i$ $N_i$	$f_i$	$F_i$
$x_1$	$n_1$ $N_1 = n_1$	$f_1 = (n_1/n)$	$F_1 = f_1$	
$x_2$	$n_2$ $N_2 = n_1 + n_2$	$f_2 = (n_2/n)$	$F_2 = f_1 + f_2$	
...	...	...	...	
$x_n$	$n_n$ $N_n = \Sigma n_i$	$f_n$	$F_n = \Sigma f_i$	

Cuadro 2.10: Tablas de frecuencias. Elaboración propia (2018)

El cuadro 2.10 muestra la ordenación típica de datos relativos a los distintos valores de la variable X considerada sobre las veces que se produce el suceso o aparece el valor  $x_i$  de la misma. Estas ordenaciones son importantes para establecer elementos fundamentales en el estudio descriptivo de los datos así, podremos establecer:

- Intervalos de valores  $[x_i, x_j]$ : que nos permiten establecer intervalos de valores extremos representativos y entre los que queremos plantear un análisis más concreto.
- Representaciones gráficas: que serán gráficos que elaboramos para representar los valores numéricos con barras, sectores, líneas, dispersión que nos permiten obtener una visión de conjunto de todos los datos que representemos pudiendo ver tendencias, dispersiones o concentración, tendencias, linealidad o no, entre ellos podemos considerar:
  - Histograma: se emplea para variables cuantitativas agrupadas o discretas por ser más adecuado para estas.
  - Polígono  $N_i, F_i$ : que suelen representar con polígonos que dan una visión general de las frecuencias acumuladas.

- Distribuciones continuas: la distribución de frecuencias continuas se presenta cuando la muestra es lo suficientemente grande y no es necesario representar intervalos o polígonos. Las distribuciones son muy interesantes a la hora de saber como se agrupan los valores, como se comportan de un vistazo rápido.

### Estadística descriptiva

Una vez vistas una batería de definiciones básicas, vamos a ver las medidas que debemos considerar en la fase de estudio descriptivo de un problema. En esta fase nos apoyaremos en tres tipos de mediciones:

- Medidas de posición o tendencia central: que son medidas promedios que nos permiten comparar distintas variables de forma centralizada que son:

- Media  $\bar{x}$ : donde empleamos todos los valores comprendidos en el intervalo  $[x_i, x_j]$  es como la media aritmética de los valores del intervalo.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.26)$$

- Media geométrica  $\bar{x}_g$ : que representa los promedios de los valores del intervalo viene dada por la expresión de la raíz n-esima del producto de los valores del intervalo.

$$\bar{x}_g = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (2.27)$$

- Media armónica  $\bar{x}_a$ : con ella se busca establecer relación existente entre dos variables como por ejemplo espacio y velocidad.

$$\bar{x}_a = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} \quad (2.28)$$

- Media ponderada  $\bar{x}_p$ : con ella asignamos un peso  $\omega_i$  a cada variables que se vea implicada en el estudio que actúa como multiplicador en la fórmula.

$$\bar{x}_p = \frac{x_1\omega_1 + x_2\omega_2 + \dots + x_n\omega_n}{\Sigma\omega_i} \quad (2.29)$$

- Mediana  $M_e$ : es un valor tal de la variable que hace que los valores de la variable queden distribuidos al 50% a izquierda y derecha del mismo.

$$M_e = \frac{x_{n/2} + x_{(n/2)+1}}{2} \quad (2.30)$$

- Moda: que está representada por el valor que más se repite en los datos que hemos recopilado y que pretendemos analizar.
- Cuartiles Q: en los que podemos dividir los datos en grupos de estilo cuartil, decil, o percentil dejando a su derecha el % considerado así, un cuartil de orden  $p$  tal que  $(0 < p < 100)$  deja el  $100\% - p\%$  a su derecha.

- Medidas de dispersión: estas indican el nivel de concentración de los datos que están analizando y, por otro lado, nos informan sobre la bondad de los promedios calculados como representativos del grupo de datos, las más relevantes son:

- Varianza y desviación típica  $S^2$  y  $S$ : la varianza y su raíz cuadrada positiva son las medidas de este más importantes y fundamentales en estadística. Su expresión viene dada por la fórmula

$$S^2 = \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.31)$$

$$S = +\sqrt{S^2} \quad (2.32)$$

la raíz cuadrada positiva será la desviación típica. La fórmula se hará 0 cuando todos los valores del intervalo sean iguales a la media.

- Recorrido o Rango  $R$ : se conoce al hacer la diferencia entre el mayor y el menor de los valores; debemos tener cautela cuando existen valores muy aislados unos de otros ya que el sentido de este queda distorsionado y puede inducir a error en la interpretación del mismo. Es una medida de dispersión de la distribución. Se pueden plantear también recorridos inter-cuartílicos o semi-intercuartílicos.
- Coeficiente de variación: se obtiene entre la desviación típica y el valor absoluto de la media y sirve también para medir la dispersión.

$$CV = \frac{S}{|x|} \quad (2.33)$$

- Medidas de forma: estas medidas las empleamos para interpretar la representación gráfica de los datos del estudio que hayamos hecho y o distribución. Fundamentalmente se emplea la simetría y el apuntamiento de la curva de distribución normal.

- Simetría: se puede presentar simetría respecto de la  $Me$  o la  $\bar{x}$  cuando al levantar un eje perpendicular a alguno de estos valores el dibujo es simétrico respecto al mismo. Cuando no es así, se presenae asimetría que será positiva si el desplazamiento de la curva es a la derecha del eje trazado y negativa cuando se produce a la izquierda del eje que hemos considerado en principio. Tal y como podemos ver en la figura 2.13 (de distribución normal).

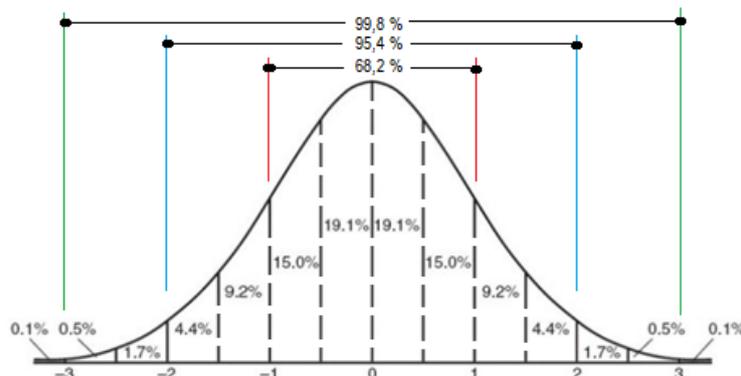


Figura 2.13: Curva de distribución normal. Elaboración propia (2018)

Esta curva es simétrica, los desplazamientos o asimetrías se producirán cuando el máximo de la curva se desplace a izquierda o derecha en los términos de la formulación del primer coeficiente de Fisher que opera de la siguiente forma

$$g_1 = \frac{m_3}{S^3} \quad (2.34)$$

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (2.35)$$

Cuando  $g_1 < 0$  es asimétrica negativa; si  $g_1 = 0$  es simétrica y si  $g_1 > 0$  es asimétrica positiva.

- **Apuntamiento:** la medida de Curtosis estudia la concentración de las frecuencias en la zona central de la distribución y, cuanto más grande es la concentración, más apuntada será la curva. La distribución normal tiene forma de campana de Gauss y estructura probabilística dada por

$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2S^2}} \quad (2.36)$$

Si consideramos  $S = 1$  y  $\bar{x} = 0$  la curva será de la forma que podemos ver en la figura 2.13; el mayor o menor achaparramiento de la curva lo podremos ver de forma matemática empleando el segundo coeficiente de Fisher o el coeficiente de Curtosis que dice

$$g_2 = \frac{m_4}{S^4} - 3 \quad (2.37)$$

$$m_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 \quad (2.38)$$

Cuando  $g_2 < 0$  es menos apuntada o Platicúrtica; si  $g_2 = 0$  es Mesocúrtica; si  $g_2 > 0$  es más apuntada o Leptocúrtica.

Todos estos elementos, junto a otros que explicaremos en el apartado siguiente, son empleados en estadística descriptiva para, con posterioridad, hacer inferencias sobre las poblaciones y datos objeto de estudio.

### Estadística inferencial

Esta parte de la estadística es con la que elaboramos conclusiones válidas sobre los datos pertenecientes a una población en estudio sobre la base del cálculo de probabilidades y, partiendo de una muestra representativa de la anterior. las conclusiones se basarán en las inferencias de las características concretas de nuestras variables aleatorias. Existen dos tipos de inferencia [108]:

- **La inferencia paramétrica:** esta se produce cuando se conoce la distribución de probabilidad de la variable analizada pero los parámetros son desconocidos y se intenta aproximar o predecir el valor de dichos parámetros.

- **Inferencia no paramétrica:** con ella se tratará de averiguar el modelo concreto de la variable objeto de estudio o bien, se intentará profundizar en el conocimiento de la misma sin presuponer ninguna función de densidad concreta. Se trata de dar respuesta a preguntas del tipo: ¿el consumo de los distintos tipos de buques sigue una distribución normal con respecto a su eslora?.

La inferencia estadística permite crear modelos de predicción asociados a los fenómenos en estudio, teniendo presente la aleatoriedad de las observaciones y partiendo de los muestreos realizados las inferencias pueden tomar forma de:

1. Pruebas de hipótesis: respondiendo afirmativamente o negativamente a una pregunta.
2. Estimaciones: en base a características numéricas.
3. Pronósticos: sobre futuribles en base al estudio de datos reales.
4. Correlaciones: que son descripciones de asociación de variables.
5. Análisis de regresión: en base a modelado de relaciones entre variables implicadas.

Para poder trabajar en este campo será necesario conocer una serie de elementos que nos ayudan a hacer inferencias sobre los datos que hemos recolectado para nuestro estudio así tenemos que definir:

- Intervalos de confianza  $d$ : delimitados por un par de números entre los cuales se estima que (con cierto nivel de probabilidad de acierto) estará el valor del parámetro en la población.
- Nivel de confianza  $\alpha$ : es la probabilidad de que el intervalo de confianza contenga el valor real extensible a la población que viene dado por  $n(1 - \alpha) = Z_\alpha$  el valor de  $\alpha$  se considera generalmente entre los valores del  $[0,05 : 0,15]$  que arrojan valores normalizados de la variable que podemos ver en la tabla 2.11 de distribución normal.

Nivel de Confianza	$Z_\alpha$
99	2,576
98	2,326
97	2,17
96	2,054
95	1,96
94	1,881
93	1,812
92	1,751
91	1,695
90	1,645

Cuadro 2.11: Tabla de nivel de confianza. Elaboración propia (2018)

- **Contraste de hipótesis:** este es el procedimiento empleado para comprobar si una propiedad, que suponemos cumple una población, es coherente con lo observado en la muestra siguiendo una serie de pasos:
  1. Qué se quiere demostrar: nos obliga a preguntar y saber que estadísticos nos ayudarán en mayor medida a obtener información útil para el estudio.
  2. Qué precisión necesitamos: que es inversamente proporcional al error aleatorio y depende por tanto, del tamaño de la muestra que se tome.
  3. La variabilidad  $\theta$ : dependiendo de la mayor o menor homogeneidad de la muestra que tomemos, tendremos que considerar muestras mayores para poblaciones de datos muy heterogéneas y más pequeños para las que sean homogéneas.
  4. Tipo de muestreo: dependiente del tipo de muestreo que tomemos tendremos mayor o menor variación y esto debemos tenerlo también presente en el estudio del problema.
  5. Tamaño de la población: cuando la población aumenta, la muestra debe aumentar pero, como paradoja, en poblaciones muy grandes el tamaño de la muestra llega a un momento que no influirá en el resultado final por lo que llegará un punto en el que los resultados con una población máxima serán los mismos por mucho que se aumente esta.
- **Tamaño de la muestra  $n$ :** con población infinita un valor de  $n = 30$  es suficiente. De todas formas, si queremos reducir el intervalo de confianza  $d$ , debemos ampliar el tamaño de la muestra  $n$  ya que, si aumenta la población  $\theta$  también debe aumentar el tamaño de la muestra. La variabilidad se concentra en el  $S^2$  para variables cuantitativas y en la proporción  $p$  por la diferencia  $(1 - p)$  en el caso de las variables cualitativas  $p(1 - p)$ . La fórmula de cálculo del tamaño de la muestra viene dada por el valor

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \times \theta}{d^2} \quad (2.39)$$

Debemos tener presente que  $Z$  se corresponde con el valor de la variable estandarizada para el nivel de confianza  $\alpha$  que se considere.

- **Tablas de distribución normal:** ofrecen las relaciones entre los niveles de confianza y los valores de  $Z_{\alpha}$  como podemos ver en el cuadro 2.11.

Dependiendo de las variables que comparemos en nuestro estudio hablaremos de análisis bidimensional y multidimensional. El primero es en el que solo comparamos dos variables  $X/Y$ , el segundo es el caso más frecuente y es en el que tenemos que estudiar múltiples variables relacionadas en el problema. En el bidimensional establecemos relaciones sencillas empleando:

- **Coefficientes de correlación:** estos nos hablan sobre la fortaleza de la relación de las observaciones de dos variables. Los más empleados son:
  - **Coefficiente de correlación de Pearson  $r$ :** es una correlación lineal en la que se busca conocer el grado de relación de dos variables cuyo valor absoluto debe encontrarse entre 0 y 1. Cuando el valor es negativo tiene el

mismo significado que cuando es positivo, únicamente indicará que la correlación es inversa entre las variables estudiadas. La fortaleza de la correlación  $r$  de Pearson viene dada por la proximidad al valor absoluto máximo. Para conocer la entidad de correlación tomaremos como referencia la siguiente distribución de valores:

1. Si  $r$  está entre 1 y 0,5 en valor absoluto la correlación es fuerte.
2. Si  $r$  está entre 0,5 y 0,3 en valor absoluto la correlación es moderada.
3. Si  $r$  está entre 0,3 y 0,1 en valor absoluto la correlación es débil.
4. Si  $r$  está por debajo de 0,1 la correlación es muy débil o inexistente.

La formulación que aplicaremos será la siguiente:

$$r_{xy} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2.40)$$

Donde:

- El valor de  $r$  es el valor de la correlación.
- El numerador representa el valor de la covarianza de las matrices de las variables  $X/Y$ .
- El denominador es el producto de las desviaciones típicas de las variables estudiadas.

Podemos establecer tablas de correlación como las que podemos ver en el cuadro 2.12

X/Y	$y_1$	$y_2$	$y_3$	...	$y_1^n$
$x_1$	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	...	$n_{1n}$
$x_2$	$n_{21}$	$n_{22}$	$n_{23}$	...	$n_{2n}$
$x_3$	$n_{31}$	$n_{32}$	$n_{33}$	...	$n_{3n}$
...	...	...	...	...	...
$x_n$	$n_{n1}$	$n_{n2}$	$n_{n3}$	...	$n_{nn}$

Cuadro 2.12: Tabla de datos de correlación. Elaboración propia (2018)

- Coeficiente de asociación de  $\phi$  o de Matthews: permite cuantificar la relación entre ambas variables de forma sencilla. Solo válido para correlaciones binarias y dicotómicas es decir, que una anula a la otra. Definido en  $[-1, 1]$ ; cuanto más cerca de los extremos más fuerte es la relación. Es una correlación de carácter nominal dicotómica como las que podemos ver en el cuadro 2.13. Lo podemos representar matemáticamente como

$$\phi = \frac{|BC - AD|}{(A + B)(A + C)(C + D)(B + D)} \quad (2.41)$$

- Covarianza  $S_{XY}$ : nos permite conocer el grado de variación en conjunto de dos variables aleatorias con respecto a las medidas de las mismas.

$$S_{XY} = \frac{1}{n} (1/n) \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y} \quad (2.42)$$

X/Y	$y_1$	$y_2$	TOTAL
$x_1$	$n_{11} = A$	$n_{12} = B$	$A + B$
$x_2$	$n_{21} = C$	$n_{22} = D$	$C + D$
TOTAL	$A + C$	$B + D$	

Cuadro 2.13: Tabla dicotómica. Elaboración propia (2018)

- Recta de regresión: es interesante para conocer la tendencia de los valores obtenidos y como se agrupan o relacionan. Como toda recta es de la forma  $Y = mX + b$  y nos permite predecir el comportamiento de la variable que estemos analizando, sus dos parámetros se corresponden con:
  - Pendiente  $m$ : este valor de la pendiente representa el parámetro que mide el peso de la variable.
  - Altura  $b$ : representa un término aleatorio en la ecuación

De otra forma, podemos hacer la siguiente asimilación

$$Y = mX + b \rightarrow \begin{cases} m = \beta_i \forall i = 0, 1 \dots p \\ X = X_i \forall i = 1, 2 \dots p \\ b = \varepsilon \end{cases} \quad (2.43)$$

De esta forma podemos escribir la ecuación con el parámetro variable aleatoiro  $\varepsilon$  y el termino fijo  $\beta_0$  o punto de corte considerando a  $Y_t$  los valores de la variable independiente como

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \quad (2.44)$$

Los elementos anteriores los empleamos cuando existe linealidad en los datos analizados así, como podemos ver en la figura 2.14 tenemos la representación gráfica de una muestra de la variable Y y la recta de regresión generada de aproximación. Cuando no se puede obtener esta linealidad nos vemos obligados a recurrir curvas más complejas para poder buscar las relaciones o funciones que puedan ajustar los datos de la muestra y por tanto entramos en el campo de las relaciones no lineales donde se emplean otro tipo de curvas como parábolas, hipérbolas u otros tipos de combinaciones.

### Formulación para la inferencia

Veremos ahora a modo de recopilación una serie de fórmulas que son importantes para los estudios de inferencia en estadística. Estas fórmulas permiten adaptar algunas de las anteriores a las peculiaridades de los casos en estudio, son:

- Para calcular el intervalo de confianza  $d$  aplicaremos la ecuación siguiente de forma general

$$d = \sqrt{\frac{Z_\alpha^2 \times p(1 - p)}{n}} \quad (2.45)$$

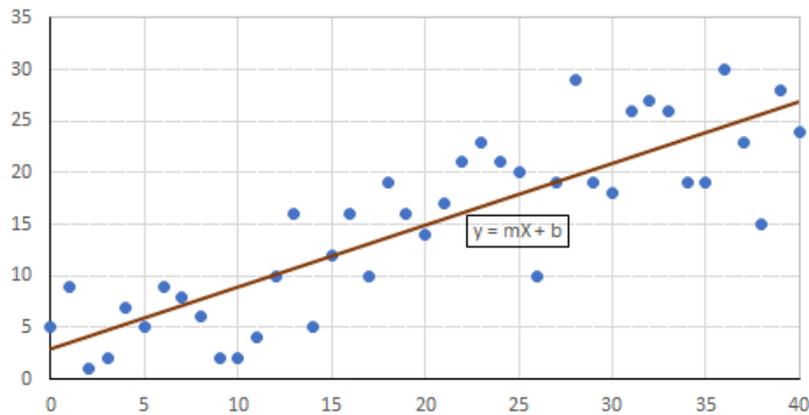


Figura 2.14: Representación gráfica de regresión lineal. Elaboración propia (2018)

- Cuando las poblaciones sean finitas menores de 100.000 debemos incorporar a la formula la población que tengamos así surge la formula para la muestra

$$n = \frac{n \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p(1-p)}{d^2(N-1) + Z_{\alpha}^2 \cdot (1-p)} \quad (2.46)$$

Donde el valor de  $d$  viene dado por la expresión

$$d = \sqrt{\frac{Z_{\alpha}^2 \times p(1-p)}{n} \times \frac{N-n}{N-1}} \quad (2.47)$$

- Para variables cuantitativas continuas debemos aplicar las siguientes formulaciones dependiendo de las características de las poblaciones que se estén analizando así la muestra se tomará en función la varianza  $S^2$  según intervalo de confianza ( $2d$ ) y error de la media  $\pm(d)$ ; nivel de confianza  $(1-\alpha)$  y  $Z_{\alpha}$ .

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot S^2}{d^2} \quad (2.48)$$

Con la población por debajo de 100.000 tenemos que aplicar para la muestra la ecuación modificada

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot S^2}{d^2(N-1) + Z_{\alpha}^2 \cdot S^2} \quad (2.49)$$

- Cuando tenemos varias variables en una muestra es muy útil emplear la siguiente fórmula para poblaciones de muestra infinitas

$$d = \sqrt{\frac{Z_{\alpha}^2 \cdot S^2}{n}} \quad (2.50)$$

Para las muestras finitas podemos emplear la fórmula

$$d = \sqrt{\frac{Z_{\alpha}^2 \cdot S^2}{n} \cdot \frac{N-n}{N-1}} \quad (2.51)$$

Hasta este punto hemos visto la formulación básica para el análisis de datos de forma estadística que podemos aplicar en un estudio de variables representativas relacionadas con la EE. Esta formulación nos permitirá analizar bases de datos compuestas por variables tales como temperaturas, consumos, variables ambientales interiores y exteriores para comprobar como participan estas en la EE del buque como sistemas y de sus sistemas embarcados de forma particular.

Estos elementos son importantes para conocer las tendencias de los datos que se puedan analizar para tomar decisiones en el marco de la mejora de la EE. Desde la estadística descriptiva podremos establecer la imagen que nos permita hacer inferencias, predicciones y elaborar modelos partiendo de los datos obtenidos si bien, debemos tener presente que es fundamental en el campo de la EE la dimensión temporal es fundamental, pues estas variables son dinámicas y requieren de un estudio en el que se tenga presente el tiempo ( $t$ ). Por otro lado, el análisis de las variables es multidimensional, lo que complicará el estudio y obligará en ocasiones a tener que emplear atajos de carácter heurístico que nos permitan aproximar una solución. Otro elemento importante es efectuar un control estadístico de procesos de los sistemas energéticos embarcados que nos permitan conocer la bondad de los mismos y su desempeño.

### 2.8.2. Control estadístico de la calidad de procesos

El Control Estadístico de Procesos (CEP) se emplea para estudiar y conocer la mayor o menor estabilidad de los mismos, buscando reducir su variabilidad ya que, a menor variabilidad mayor desempeño del proceso en estudio. En el CEP es necesario recolectar los datos de forma ordenada y clara, teniendo presente que las variables que consideremos estarán influidas por la dimensión temporal ( $t$ ).

En general, los datos controlados no son homogéneos y sufren cierta variabilidad, esta variabilidad hace que sus valores se distribuyan dentro de un rango en el que queremos controlar el proceso y, este rango, se determinará desde el análisis de muestras de la población considerada y nos dará información sobre el desempeño del proceso estudiado [109].

La variabilidad en los procesos viene dada por dos tipos de causas, las causas comunes y las causas especiales; las primeras son aquellas cuya variabilidad puede predecirse fácilmente pero que no deben ser menospreciadas en el estudio del proceso y, las causas especiales o asignables, que son aquellas que pueden producir un error fatal en el proceso y que no son típicas o inherentes al mismo dejando este fuera de control [110].

Ambos tipos de causas deben ser eliminadas del proceso así, para detectarlas hay que caracterizarlas. En el caso de las causas comunes estas son abundantes, producen variaciones pequeñas, son inherentes al proceso y difíciles de eliminar del mismo y, por otra parte, las variables especiales o asignables son pocas, pero con efectos de entidad en el proceso que estudiamos y son más fáciles de eliminar del proceso [111].

Generalmente empleamos para controlar esta variabilidad y distribución gráficos de dispersión de las variables los cuales, emplean límites de control para conocer si el proceso que estamos estudiando está controlado o no. El desempeño del proceso, que no es más que ver como se ajusta el mismo al resultado esperado, debe medirse usando indicadores de desempeño lo que requiere del uso de variables y sus relacio-

nes que permitan cuantificar el logro o éxito del mismo. Existen distintos gráficos o cartas de control estadístico de la calidad de los procesos.

El CEP es muy empleado en la industria para controlar los procesos de producción empleando funciones o indicadores de desempeño como son la eficacia del proceso para obtener el producto, la eficiencia del mismo, la economía de su funcionamiento y su calidad. De igual forma estos elementos de control pueden ser empleados en EE de forma general y, en particular al control de los procesos energéticos del buque de guerra. Con ellos podemos controlar el consumo y la generación, dentro de parámetros de EE para cumplir con los objetivos, la eficiencia en el consumo, la economía del proceso y su calidad.

La necesidad de controlar los procesos y su calidad es de vital importancia hoy en día. Según la operación o proceso que queramos controlar (financiera, industrial, mantenimiento etc.) estamos obligados a emplear programaciones sistemáticas que nos permitan obtener el mejor de los desempeños del proceso. Podemos decir que el control estadístico de la calidad de un proceso es aquel en el que, mediante la aplicación de técnicas estadísticas, controlamos un proceso para comprobar su idoneidad y la del resultado o producto final del mismo.

Una filosofía muy empleada en cuestión de aseguramiento de la calidad de los procesos es el Six-Sigma ( $6\sigma$ ) que busca reducir el número de fallos en un proceso mejorando la calidad de los mismos y perfeccionándolos [112]. Es empleado en múltiples campos que van desde la actividad industrial [113], actividades de mantenimiento [114] o a la propia EE [115]. La técnica sistemática fue empleada por Motorola en los años 80 del pasado siglo con gran éxito, reduciendo los fallos de forma considerable hasta 3 ó 4 fallos por millón de sucesos [116], esto es lo que se denomina tener una compañía ( $6\sigma$ ). Cuando aumentamos el número de fallas en el proceso iremos reduciendo el nivel  $\sigma$  del proceso, si se nos presentan 233 fallos por cada millón de sucesos tendremos una organización o proceso  $5\sigma$ ; si pasamos a 6.210 fallos tendremos un proceso  $4\sigma$ ; un número de fallos igual a 66.807 será el ofrecido por procesos  $3\sigma$ . Generalmente la mayoría de empresa operan en niveles de 2 y  $3\sigma$  con un número de fallos de entre 66.807 y 308.538 [117] lo que hace que aparezcan problemas de negocio o procesos defectuosos.

El ( $6\sigma$ ), su filosofía, se basa en una serie de procesos ordenados en los que empleamos herramientas estadísticas con la secuencia:

1. Definir: es el primer paso de todos, en el definiremos que procesos serán objeto de evaluación en la organización o sistema.
2. Medir: con ello podremos conocer cuál es el estado del fallo, defecto o problema que aqueja al proceso en estudio y que queremos mejorar.
3. Analizar: facilitará, mediante el contraste e interpretación de los resultados medidos e históricos localizar las causas del fallo o problema.
4. Mejorar: actuamos ahora sobre los procesos mejorando los mismos con respecto a su funcionamiento anterior.
5. Controlar: mediante la aplicación de medidas que nos permitan garantizar tanto la continuidad de los procesos estudiados como su eficacia.

Para la aplicación de la filosofía Six Sigma se emplea herramientas estadísticas que nos permitan desarrollar la misma, estas herramientas son [118]:

1. Diagramas de flujo de proceso: con estos descomponemos el proceso en sus etapas, de forma secuencial y ordenada y mostrará, además, los elementos críticos en el mismo. En la figura 2.15 podemos ver representado un proceso sencillo imaginario compuesto por un inicio, una serie de procesos ordenados 1 a 3, una decisión del mismo con una tarea intermedia caso de ser la respuesta negativa, y un fin. Este tipo de gráficos son de gran utilidad, el de la figura 2.15 emplea símbolos típicos de los sistemas si bien se pueden emplear otros tipos. Son muy empleados por ejemplo en actividades industriales, financieras o sanitarias [119], en general cualquier proceso requerirá de unas entradas, un proceso, unos recursos para poder desarrollar este y unas salidas como resultado de todo lo anterior [120].

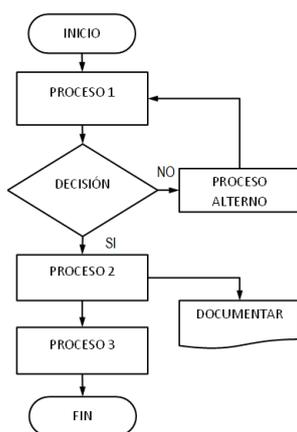


Figura 2.15: Gráfico de proceso tipo. Elaboración propia (2018)

2. Diagramas causa efecto: estos se emplean para detectar causas y consecuencias de los problemas del proceso estudiado. En la figura 2.16 podemos ver un ejemplo que presenta una serie de causas externas e internas del proceso responsables del efecto. Son denominados también diagramas de espina de pescado y fueron propuestos por K. Ishikawa en los años ochenta del pasado siglo XX [121].

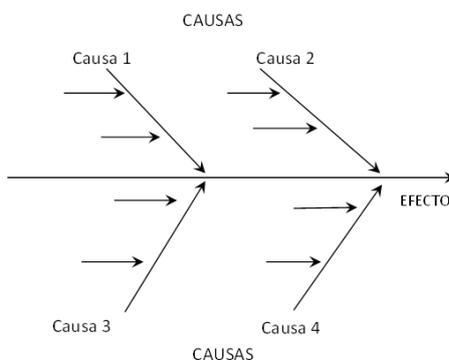


Figura 2.16: Gráfico causa efecto. Elaboración propia (2018)

3. Diagramas de Pareto: con estos diagramas buscamos identificar las causas pri-

marias de los problemas del proceso en estudio y su mayor o menor incidencia con lo que, a la hora de eliminar estas del proceso, empezaremos por aquellas con más efecto sobre el mismo ya que facilitan una mejora mayor. En la figura 2.17 podemos ver una de estas representaciones. Se combina mucho con el proceso de Análisi de Modo y Efecto de las Fallas (FMEA) existiendo abundantes ejemplos desde la aplicación a la fabricación de patatas fritas [122] como en proceso de análisis de procesos de formación [123] o, en el campo de la energía [124].

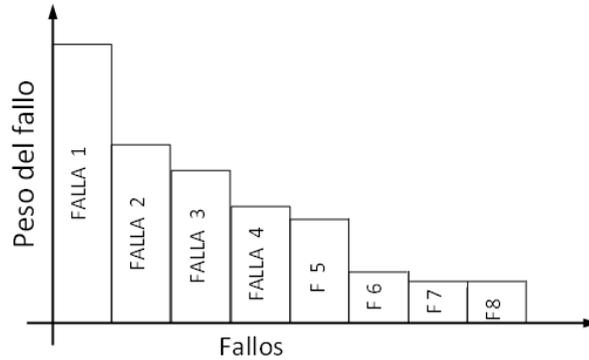


Figura 2.17: Gráfico de Pareto. Elaboración propia (2018)

- Histogramas: que nos permiten hacer agrupaciones Gaussianas sobre la base de límites superior e inferior del proceso y su tendencia central con ello, podremos obtener información sobre la variabilidad del proceso. En la figura 2.18 podemos ver una representación de este tipo de gráficos empleados de forma recurrente en estudios estadísticos por ser un elemento gráfico que permite efectuar inferencias de forma rápida sobre los datos. Son de aplicación en el campo de gran aplicación en ingeniería [125].

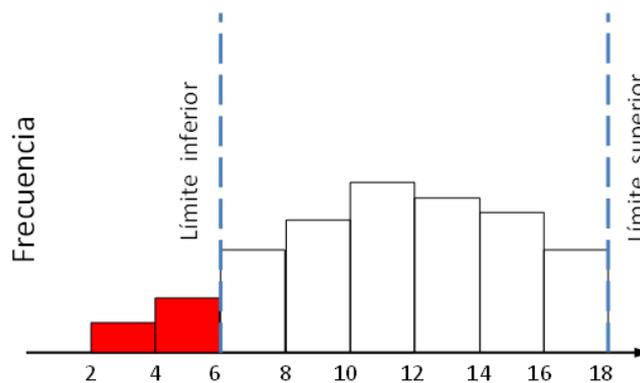


Figura 2.18: Gráfico tipo histograma. Elaboración propia (2018)

- Gráficos de recorrido: son la representación de los datos obtenidos para una

variable en relación al tiempo ( $t$ ) y nos permiten detectar los cambios en el proceso a lo largo del tiempo y con ello ver las tendencias del mismo. La figura 2.19 representa uno de estos gráficos y los valores de una variable con respecto al tiempo.

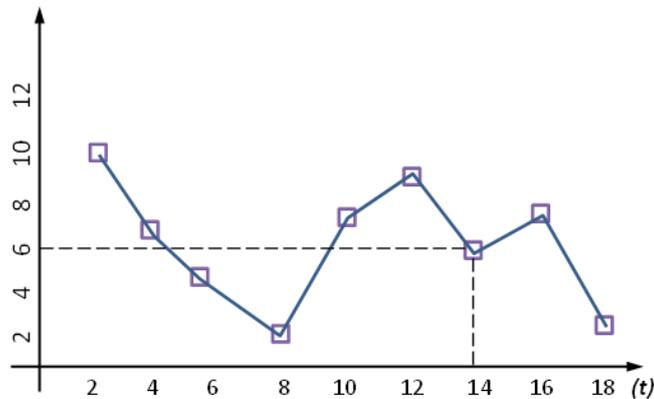


Figura 2.19: Gráfico de recorrido. Elaboración propia (2018)

6. Gráficos de control: con ellos podemos identificar causas que afectan al valor promedio del proceso y facilitar así la toma de decisiones. Un esquema sencillo de gráfico de control lo podemos ver en la figura 2.20. Existen múltiples variantes de este tipo de gráficos pero, se basan fundamentalmente en establecer unos límites de control superiores e inferiores que nos permiten conocer, a la vista de los datos, el estado de control del proceso cuando los valores de las variables se encuentran dentro de estos y están cercanos a la línea de referencia dada por el valor de la media estimada respecto de una muestra inicial de datos.

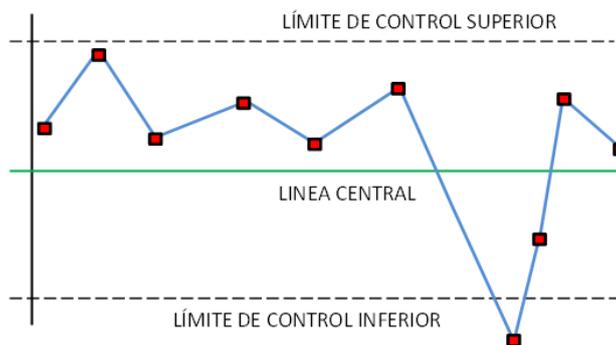


Figura 2.20: Gráfico de control de proceso. Elaboración propia (2018)

7. Modelos de regresión: permiten elaborar un modelo de relación entre las variables de entrada y sus respuestas facilitando así, la predicción de las mismas.

En la figura 2.21 podemos ver en principio los valores representados según un gráfico de dispersión en el que podemos ver las correlaciones entre los valores de dos variables, como explicamos en el apartado 2.8.1 y sobre la que aparece dibujada una función de regresión lineal de los datos.

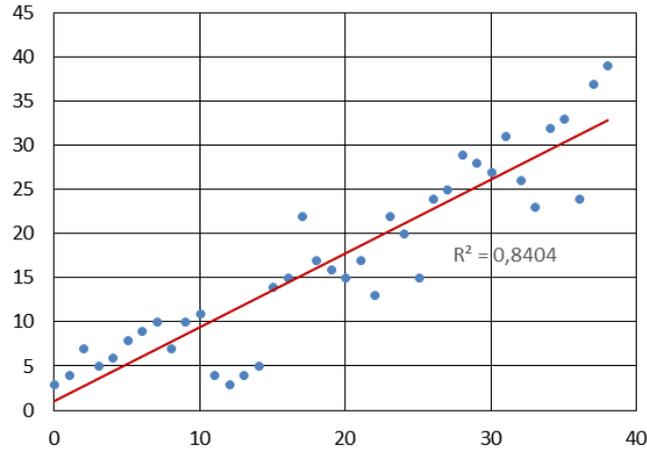


Figura 2.21: Gráfico de regresión dispersión. Elaboración propia (2018)

8. Procesos de mejora continua: consistentes en las tecnologías que facilitan la estabilidad de los procesos estandarizando los mismos.
9. Diseño de procesos: con el diseño de procesos marcaremos la misión de este, las necesidades, las estrategias del mismo los planes de análisis de la información obtenida y el análisis y mejora del proceso.
10. Análisis de la varianza: esta es la técnica de contraste de hipótesis de vital importancia en procesos en los que influyen más de dos variables que complican la formulación matemática de los mismos.
11. Cuadros de mando integrales: empleados para la implantación de la estrategia en la empresa, proceso o sistema deseado.
12. Diseño de experimentos: estos experimentos de carácter estadístico nos permiten desde las variables de muestreo, observar la influencia en el proceso de factores que consideremos.
13. Control estadístico de procesos (CEP): con el que podemos identificar las causas de la variabilidad del proceso.

En definitiva, con el Six Sigma tratamos de identificar las CTQ, FMEA que se producen en el proceso y diseño de experimentos (Design of Experiments (DoE)) para identificar las variables críticas y establecer los objetivos del proceso de forma clara y precisa. La última de las fases del proceso Six Sigma se apoya en gran medida en el CEP destacando como la principal de sus herramientas los gráficos de control de procesos de los que veremos los más empleados a continuación detalladamente.

### 2.8.3. Gráficos de control

Los gráficos de control, también denominados cartas de control o en inglés “Control Charts” son representaciones que nos permiten controlar y monitorizar de forma gráfica el estado del proceso que estemos analizando referido a la dimensión temporal generalmente ( $t$ ). Los gráficos de control son sencillos de construir y de gran utilidad para controlar la estabilidad y conocer tendencias de los procesos en un rango determinado.

Evidentemente, también presentan sus inconvenientes ya que, aunque reflejan la estabilidad de un proceso esto no implica que el mismo se encuentre dentro de parámetros de calidad óptima es decir, puede suceder que desde los criterios que hayamos marcado consideremos que el proceso está bajo control pero en realidad, puede estar fuera de control observado desde la perspectiva de los agentes externos como pueden ser el cliente del producto que elaboremos, la capacidad de absorción de un medicamento por ciertos individuos o la validez de técnicas docentes que sometamos a estudio [126]. Todo esto tiene mucho que ver con la capacidad de proceso y su desempeño es decir, lo eficiente que está siendo el mismo.

De forma general los gráficos nos ofrecen información sobre el nivel de control de un proceso con cierta variabilidad así podremos distinguir tres situaciones:

1. **El proceso es controlado y además capaz:** Esto quiere decir que el proceso se encuentra dentro de los límites inferior y superior que le hemos marcado y, su capacidad significa que el proceso es eficiente. Solo se presentan causas naturales que afectan al mismo que son más que la variabilidad propia del proceso dentro de los límites de control establecidos.
2. **El proceso es controlado pero no capaz:** el proceso está en control, pero no es capaz de mantenerse en rangos deseados. de igual forma, solo se presentan variables naturales del proceso e inherentes al mismo.
3. **El proceso está fuera de control:** estos procesos están descentrados de los límites de control debido a que en la variabilidad del mismo está afectado por causas denominadas imputables que son variaciones que afectan al proceso por algún problema ajeno al mismo como puede ser en una línea de elaboración las averías de las máquinas. en la figura 2.22 podemos ver representadas las tres situaciones que se nos pueden presentar en los procesos; las líneas rojas determina la zona de control y se ajustan a los límites que hemos determinado de calidad para nuestro producto o proceso, siendo la línea verde la que se ajusta a los parámetros de calidad óptima.

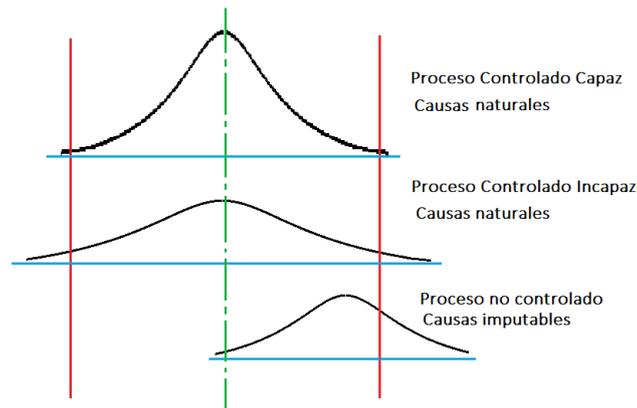


Figura 2.22: Tipología de los procesos. Elaboración propia (2017)

Los gráficos de control son herramientas muy efectivas para el control estadístico de procesos y por ello, a lo largo del tiempo, han ido apareciendo distintos gráficos que se encaminan a controlar los procesos desde distintos puntos de vista. Los gráficos más empleados en control de calidad estadística son:

- Los gráficos de Shewhart.
- Los gráficos CUSUM.
- Los gráficos EWMA.
- Los gráficos Media Móvil (MM).

Como ya hemos comentado, para poder aplicar a un proceso un gráfico de control, este debe tener como característica fundamental la estabilidad para ser predecible dentro de la aleatoriedad a la que están sometidos los procesos a los que se aplican. Así, el proceso puede ser perfecto, es decir que siempre presenta el mismo valor a lo largo del tiempo (proceso ideal) o puede variar en cierta medida en un entorno próximo al valor medio de referencia a lo largo del tiempo. Esta última situación es la que se suele presentar normalmente en cualquier proceso que analicemos y al que queramos aplicar este tipo de gráficos [127].

De forma general, para construir un gráfico de control partiremos de una muestra de valores de la variable que queremos cuantificar, medir y controlar comprobando la normalidad de la muestra y, caso de existir valores fuera de los criterios de normalidad procederemos a su eliminación. Tras esto debemos proceder a marcar la línea central Línea Central (LC) del proceso, cuyo valor se recomienda establecer con un número suficiente de análisis de la muestra de control que puede estar entre 20 y 30 veces. Tras esto es necesario establecer los límites del gráfico de control que serán de dos tipos, un primer límite de aviso, Límite de Aviso Superior (LAS) y otro Límite de Aviso Inferior (LAI) y un segundo límite de control, Límite de Control Superior (LCS) y un Límite de Control Inferior (LCI). El primero se suele situar a  $\pm 2\sigma$  y el segundo a  $\pm 3\sigma$  de todas formas, podemos considerar los valores 2 y 3 absolutos para los límites cuando la muestra es suficientemente amplia en valores (mayor de 30 valores).

Veremos a continuación de forma particularizada como construimos los elementos antes mencionados dependiendo del tipo de gráfico que queramos emplear.

### Gráficos Shewhart

W. A. Shewhart fue el primero en desarrollar gráficos de control de procesos para la Bell Co. en la década de los años 20 del pasado siglo, publicando un libro sobre control de calidad en 1931 en el que se tratan muchos otros temas, además de sus famosos gráficos de control [128]. El objetivo de estos gráficos de control no es otro que el de obtener un grafo que nos permita monitorizar variables de un proceso de forma analítica. Para ello debemos seleccionar una muestra inicial de valores que, como característica, debe ser de estabilidad contrastada como ya hemos comentado anteriormente para poder construir un gráfico válido.

La formulación básica para construir este tipo de gráficos parte de considerar una distribución normal  $N(\mu, \sigma)$  donde al tomar una muestra  $n$  de la población obtengamos un valor de media  $\bar{X}$  que se encontrará siempre entre los valores de  $\frac{\mu-3\sigma}{\sqrt{n}}$  como LCI y  $\frac{\mu+3\sigma}{\sqrt{n}}$  como LCS, considerando así el proceso bajo control.

Este proceso de toma de muestras del que obtenemos un valor para  $\bar{X}$ , debemos repetirlo de forma continua a lo largo del tiempo considerándose que, el proceso está fuera de control, cuando el valor de  $\bar{x}$  se salga de los límites de control asignados. Con los datos anteriores podemos construir lo que se denomina gráfico de medias como el que podemos ver en la figura 2.23 donde se presentan los límites y el valor de la media, con la distribución normal a la izquierda, viendo así la relación que existe entre ambos gráficos, el descrito de control con anterioridad y la curva de distribución normal que podemos ver en la figura 2.13.

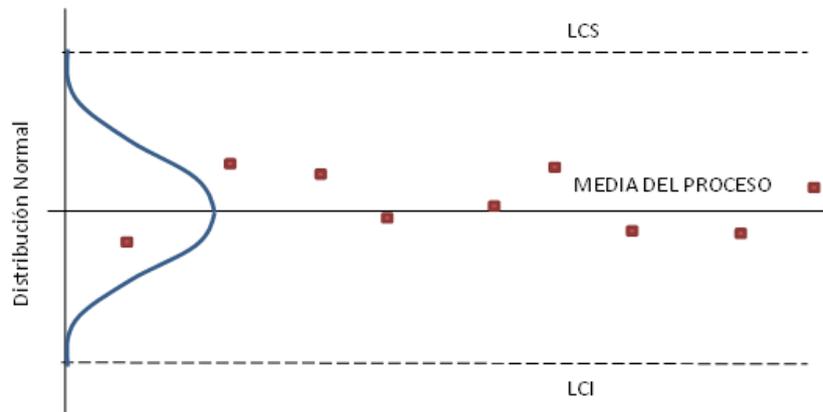


Figura 2.23: Gráfico de medias. Elaboración propia (2018)

Este primer paso de obtención del gráfico de control en base a la  $\bar{X}$  lo mejoraremos para obtener gráficos que nos permitan obtener más información del proceso y que permitan la inferencia y por tanto predecir el comportamiento del proceso así, para mejorarlo, podemos considerar la dispersión de los valores de la muestra y, empleando la desviación típica  $\sigma$  y el rango o recorrido  $R$  de la misma, obtendremos un gráfico que permitirá asegurar la estabilidad de forma más certera que solo con las medias. También podemos emplear para la construcción del gráfico la información aportada por la desviación típica de la muestra  $S$ . Obtendremos con los estadísticos anteriores los denominados gráficos “R” y “S” de recorridos o desviaciones típicas.

Para construir estos gráficos partiremos de dos supuestos, aquel en el que conocemos los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  y el contrario, cuando no los conocemos así tendremos cuatro casos:

1. Gráfico  $\bar{X} - R$ :

- a) Conocidos  $\mu, \sigma$ : cuando conocemos los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  podemos construir el gráfico de forma sencilla calculando los límites de la siguiente forma y elaborar así el gráfico de medias:

$$\begin{aligned} LCS &= \mu + \frac{3}{\sqrt{n}}\sigma = \mu + A\sigma \\ LC &= \mu \\ LCI &= \mu - \frac{3}{\sqrt{n}}\sigma = \mu - A\sigma \end{aligned} \quad (2.52)$$

Si quiero elaborar el gráfico en base a los recorridos, lo haré en base a la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} LCS &= (d_2 + 3d_3)\sigma = D_2\sigma \\ LC &= d_2\sigma \\ LCI &= (d_2 - 3d_3)\sigma = D_1\sigma \end{aligned} \quad (2.53)$$

En donde los valores de  $d_2, d_3, D_1$  y  $D_2$  2.25 son valores que podemos tomar de las tablas elaboradas para procesos normales en función del tamaño de la muestra  $n$ .

- b) Desconocidos  $\mu, \sigma$ : cuando no conocemos los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  debemos proceder a estimar un valor de  $\mu$  partiendo del cálculo de la media de las medias que notaremos como  $\bar{\bar{X}}$  y, para  $\sigma$  desde el rango medio de una serie de muestras  $k$  que consideremos y que notaremos como  $\bar{R}$ . El número de muestras que se suele considerar aceptable está entre 15 y 30. Con nuestros valores medios calcularemos los límites de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} LCS &= \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \frac{1}{\sqrt{n}} = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R} \\ LC &= \bar{\bar{X}} \\ LCI &= \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \frac{1}{\sqrt{n}} = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R} \end{aligned} \quad (2.54)$$

De igual forma calcularemos los límites para el gráfico de recorrido que saldrán de las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} LCS &= \left(1 + 3 \frac{d_3}{d - 2}\right) \bar{R} = D_4\bar{R} \\ LC &= \bar{R} \\ LCI &= \left(1 - 3 \frac{d_3}{d - 2}\right) \bar{R} = D_4\bar{R} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Como en el caso anterior los valores de  $D_3$  y  $D_4$  los obtendremos de las tablas que podemos ver en la figura 2.25 <sup>3</sup> de valores calculados para distribuciones normales dependiendo del tamaño de las muestras. Una vez calculados los límites debemos comprobar si las muestras se salen de los mismos y, caso de ser afirmativa la contestación, habrá que buscar las causas asignables y volver a calcular los mismos de forma periódica cada  $k$  muestras.

2. Gráfico  $\bar{X} - S$ :

- a) Conocidos  $\mu, \sigma$ : cuando conocemos los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  para  $S$  el caso es análogo al anterior y por tanto los valores de los límites serán:

$$\begin{aligned} LCS &= \mu + \frac{3}{\sqrt{n}}\sigma = \mu + A\sigma \\ LC &= \mu \\ LCI &= \mu - \frac{3}{\sqrt{n}}\sigma = \mu - A\sigma \end{aligned} \tag{2.56}$$

Si no empleamos el valor de  $S$  tendremos que reescribir las ecuaciones de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} LCS &= \left( c_2 + 3\sqrt{1 - c_2^2 - \frac{1}{n}} \right) \sigma = B_2\sigma \\ LC &= c_2\sigma \\ LCI &= \left( c_2 - 3\sqrt{1 - c_2^2 - \frac{1}{n}} \right) \sigma = B_1\sigma \end{aligned} \tag{2.57}$$

Los valores de  $c_2, B_2$ , y  $B_1$  los obtenemos también de valores tabulados.

- b) Desconocidos  $\mu, \sigma$ : cuando no conocemos los valores de  $\mu$  y  $\sigma$  procederemos de forma similar a como procedimos con las medias y los recorridos solo que ahora,  $\mu$  lo estimamos con  $\bar{\bar{X}}$  y  $\sigma$  a partir de la desviación típica muestral media  $\bar{S}$  con  $k$  muestras iniciales. Con estos dos valores estaremos en condiciones de dibujar el gráfico de control:

$$\begin{aligned} LCS &= \bar{\bar{X}} + \frac{3}{c_2} \frac{1}{\sqrt{n}} \bar{S} = \bar{\bar{X}} + A_1 \bar{S} \\ LC &= \bar{\bar{X}} \\ LCI &= \bar{\bar{X}} - \frac{3}{c_2} \frac{1}{\sqrt{n}} \bar{S} = \bar{\bar{X}} - A_1 \bar{S} \end{aligned} \tag{2.58}$$

En este caso el valor de  $A_1$  esta también tabulado según la figura 2.25. Debemos tener presente que cuando se den situaciones en las que conozcamos uno de los valores de  $\sigma$  o  $\mu$  recurriremos a combinar ambos procedimientos ya estemos tratando gráficos “R” o gráficos “S”. En la figura 2.24 podemos ver un gráfico de control de Shewhart de tipo R controlado.

<sup>3</sup>Enlace: <https://optyestadistica.files.wordpress.com/2008/08/tablaactesgrafcontrol.gif>

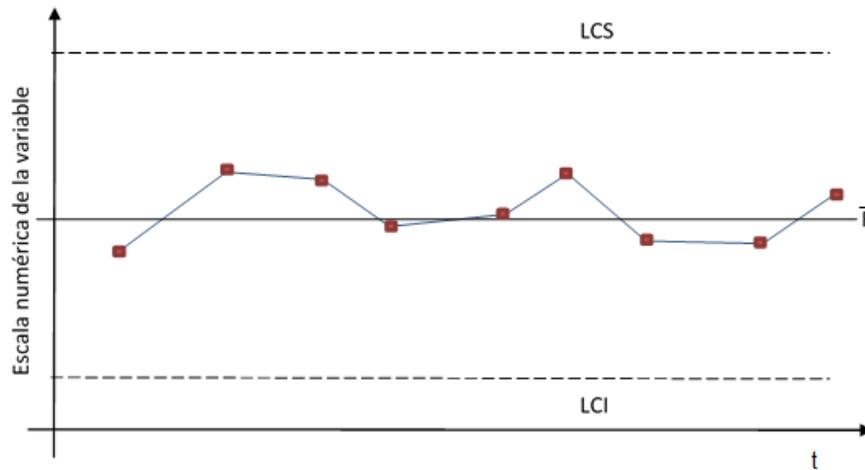


Figura 2.24: Gráfico Shewhart. Elaboración propia (2018)

En la figura 2.25 podemos ver los valores de todos los parámetros implicados en la elaboración de este tipo de gráficos de control. Podemos ver en las filas el tamaño de las muestras  $n$  y en las columnas los distintos valores que toman según el tamaño de las muestras los  $D_i, A_i, B_i$ .

Constantes para Gráficos de Control																
$n$	A	A2	A3	e4	1/e4	B3	B4	B5	B6	d2	d3	1/d2	D1	D2	D3	D4
2	2.121	1.880	2.659	0.798	1.253	0.000	3.267	0.000	2.606	1.128	0.853	0.886	0.000	3.686	0.000	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.886	1.128	0.000	2.568	0.000	2.276	1.693	0.888	0.591	0.000	4.358	0.000	2.575
4	1.500	0.729	1.628	0.921	1.085	0.000	2.266	0.000	2.088	2.059	0.880	0.486	0.000	4.698	0.000	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.940	1.064	0.000	2.089	0.000	1.964	2.326	0.864	0.430	0.000	4.918	0.000	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.952	1.051	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0.395	0.000	5.079	0.000	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.959	1.042	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.370	0.205	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.965	1.036	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.351	0.388	5.307	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.969	1.032	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.337	0.547	5.394	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.973	1.028	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.325	0.686	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.975	1.025	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.315	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.978	1.023	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.307	0.923	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.979	1.021	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	0.300	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.981	1.019	0.406	1.594	0.398	1.563	3.407	0.763	0.294	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.982	1.018	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	0.288	1.203	5.740	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.983	1.017	0.448	1.552	0.440	1.527	3.532	0.750	0.283	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.985	1.016	0.466	1.534	0.459	1.510	3.588	0.744	0.279	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.985	1.015	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	0.275	1.424	5.856	0.391	1.609
19	0.688	0.187	0.698	0.986	1.014	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.733	0.271	1.489	5.889	0.404	1.596
20	0.671	0.180	0.680	0.987	1.013	0.510	1.490	0.503	1.470	3.735	0.729	0.268	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.988	1.013	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.724	0.265	1.606	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.988	1.012	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.720	0.262	1.660	5.979	0.435	1.565
23	0.626	0.162	0.633	0.989	1.011	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.716	0.259	1.711	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.989	1.011	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.712	0.257	1.759	6.032	0.452	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.990	1.010	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.708	0.254	1.805	6.056	0.459	1.541

Figura 2.25: Datos para gráficos de Shewhart. Fuente internet (2017)

### Gráficos CUSUM

Este tipo de gráficos fueron diseñados por Page en 1954 [129] y su finalidad era detectar cambios pequeños en los procesos que queremos controlar. La detección con este tipo de gráficos se puede hacer en el entorno de  $0,5\sigma$  a  $2\sigma$ , lo que mejora los gráficos de Shewhart ya que, estos últimos, solo detectan cambios grandes en el proceso, por contra, la detección de cambios grandes es más lenta en los CUSUM. Page comprobó que si el proceso está bajo control en torno al valor de control, las

sumas acumuladas debían fluctuar en torno al valor cero [130] así, los CUSUM, emplean estas sumas hasta el valor  $i$ -ésimo de las desviaciones de los valores de la muestra respecto del valor de control objetivo que notaremos como  $\mu_0$ , si el valor está por encima de este tendremos lo que se denomina un valor en  $C^+$  y cuando está por debajo tendremos un valor de proceso en  $C^-$ .

El gráfico CUSUM, partiendo de la consideración inicial que la variables que queremos estudiar toma valores  $x_i$  dentro de una distribución  $N(\mu_0, \sigma)$  (proceso bajo control), representará los valores de la suma acumulada  $S_m = \sum_i^n (X_i - \mu_0)$  de la muestra, siendo muy eficientes en procesos con tamaño de la muestra  $n = 1$ . Estos gráficos se suelen construir sobre la base de medias  $\bar{X}$  de los valores de las muestras o directamente sobre valores individuales de la variable ( $n = 1$ ) así, sus límites son de forma algorítmica y vienen dados por las expresiones:

$$C_i^+ = \max[0, X_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+] \quad (2.59)$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_0 - K) - X_i + C_{i-1}^-] \quad (2.60)$$

El valor de  $X_i$  es el valor de la media de la muestra, considerando los valores iniciales  $C_0^+ = C_0^- = 0$ ; el coeficiente  $K$  es un valor denominado holgura que se calcula como el valor medio del valor objetivo  $\mu_0$  y un valor fuera de control  $\mu_1$  de esta forma podemos obtener el valor de  $K$  como se indica en 2.61:

$$\mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma / \delta = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma} \Rightarrow K = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} = \frac{\delta\sigma}{2} \quad (2.61)$$

Consideramos un valor de decisión  $H$  que, cuando  $C_i^+$  y  $C_i^-$  sobrepasan este valor de decisión  $H$  (generalmente  $H = 5$ ) asumimos que el proceso está fuera de control. Esta distancia  $H$  marca los límites de control a ambos lados de  $\mu_0$ . Los gráficos CUSUM determinarán un proceso sin control cuando las sumas  $S_m$  adquieran tendencia creciente o decreciente a partir de cierto punto por encima o por debajo del valor objetivo  $\mu_0$ .

En la figura 2.26 podemos ver un gráfico CUSUM con un proceso fuera de control. De forma sencilla, considerando que  $\mu_0 = 0$ , los valores de los límites de control en los gráficos CUSUM vendrán dados por las expresiones:

$$\begin{aligned} LCS &= \mu_0 + H \\ LC &= \mu_0 \\ LCI &= \mu_0 - H \end{aligned} \quad (2.62)$$

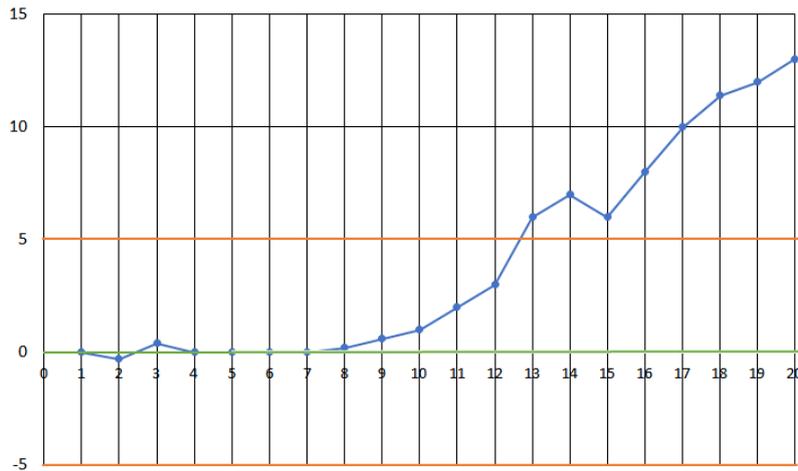


Figura 2.26: Gráfico CUSUM fuera de control. Elaboración propia (2018)

Un elemento para considerar en los gráficos CUSUM es el denominado gráfico V-Mask o máscara en V postulado por Barnard en 1959 [131] en el que se aplica un proceso de visualización en “V” para analizar este tipo de gráficos. El proceso, de forma simplificada, lo que hace es posicionarse sobre el último valor de la muestra o suma acumulada  $S_m$  sobre el que se dibuja dos brazos en “V” para comprobar que valores acumulados anteriores están fuera de las formas de esta. Si todos los valores se encuentran dentro de las formas, el proceso está bajo control, si no es así, el que esté fuera de las mismas más antiguo determinará el momento en el que el proceso se ha salido del control.

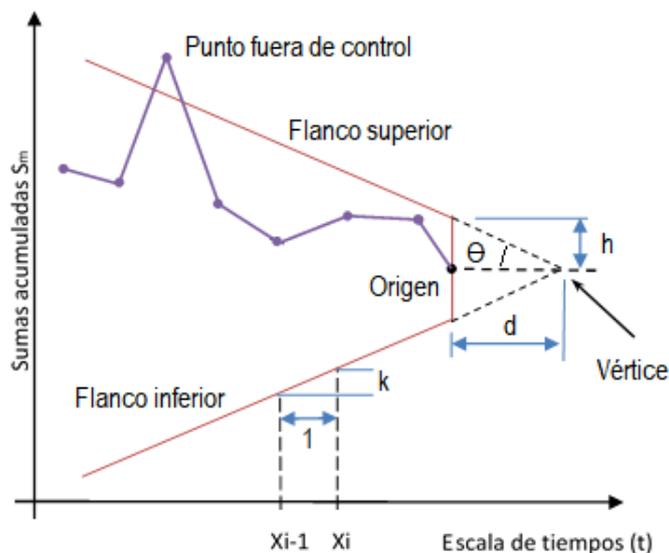


Figura 2.27: Gráfico V-Mask. Elaboración propia (2018)

La figura 2.27 muestra la construcción de Barnard en la que, consideramos el

origen máscara en “V” el último punto de la muestra  $S_{m,i}$  los puntos que se encuentran fuera de las líneas “V” será un indicador de proceso fuera de control desde el primero que se encuentre fuera en este caso a partir del tercer punto.

La construcción de los brazos de la “V” comienza por considerar un ángulo  $\theta$  que es la mitad del ángulo de los brazos de la “V” que se sitúa sobre el vértice del gráfico.

El origen es el último punto de la serie de sumas considerado  $p = Sm_{m,i}$ .

Los otros dos parámetros con los que determinamos la pendiente de los brazos pasan por considerar los valores de  $h$  que es el intervalo de decisión y  $k$  que es desplazamiento de detección en valor de sigmas  $\pm\sigma$ . La pendiente de los brazos viene dada por la expresión  $2hk/\sqrt{n}$  y el ancho de la máscara en el Origen es  $2h\sigma/\sqrt{n}$ . En una distribución normal se suelen considerar por valores de  $h = 4$  y  $k = 0,5$ .

### Gráficos EWMA

Los gráficos EWMA que podemos traducir como gráficos de media móvil ponderada exponencialmente son una herramienta que nos permite monitorizar procesos en los que se asigna un peso a los datos obtenidos del proceso el cual, va reduciendo este con el paso del tiempo  $t$ .

Comparativamente con los gráficos de Shewhart, los EWMA controlan el proceso sobre la base de la última medición junto a la mayor o menor veracidad de la base de datos histórica del proceso, con los EWMA la toma de decisiones se hace a un tiempo con la estadística temporal de los datos que se están monitorizando en cada momento y los pertenecientes a la base histórica del proceso.

Estos gráficos emplean un factor de ponderación  $\lambda$  y puede mostrar sensibilidad a variaciones pequeñas o graduales que afecten al proceso por el contrario, los gráficos de Shewhart solo reaccionan cuando el parámetro se ha salido de los límites establecidos de antemano.

Su definición matemática se debe a Roberts (1959) [132] y son de gran utilidad con variables continuas permitiendo, como ya hemos dicho, la detección de cambios pequeños en el entorno del un valor objetivo  $\mu_0$  como en el caso de los CUSUM.

Estos gráficos tiene como característica especial que permiten la reducción del ruido que pueden generar los datos que no son posibles de controlar del proceso. Para la construcción del gráfico de control EWMA tenemos que considerar un valor promedio ponderado  $Z_i$  que viene determinado por la expresión:

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \tag{2.63}$$

En la ecuación 2.63 el valor de  $\lambda$  es un valor constante de peso que oscila en el intervalo  $(0,1)$  es decir  $0 < \lambda < 1$  definiéndose el primer valor  $Z_0$  como el valor objetivo de control, es decir,  $Z_0 = \mu_0$ .

Los límites LCS, LCI y la LC los calcularemos partiendo de la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} LCS &= \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} \cdot [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \\ LC &= \mu_0 \\ LCI &= \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} \cdot [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \end{aligned} \tag{2.64}$$

En donde el valor  $L$  es el ancho de banda de valor 3 además con el paso del tiempo, el factor  $[1 - (1 - \lambda)^{2i}]$  se aproxima al valor 1 por lo que los límites se reducen a las

expresiones:

$$\begin{aligned}
 LCS &= \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}} \\
 LC &= \mu_0 \\
 LCI &= \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}}
 \end{aligned}
 \tag{2.65}$$

La expresión gráfica de este grupo de ecuaciones es la que podemos ver en la figura 2.28. En esta podemos ver como los límites varían de forma exponencial con el paso del tiempo llegando a estabilizarse. el EWMA, su fiabilidad, depende en gran medida de obtener una base de datos verdaderamente representativas del proceso que estemos analizando. Una vez calculado el valor promedio y la desviación estándar sobre esta base de datos, el proceso puede someterse a monitorización teniendo presente que el proceso estaba bajo control durante la toma de datos. Si no se cumplen estas premisas será necesario repetir el proceso de adquisición de datos.

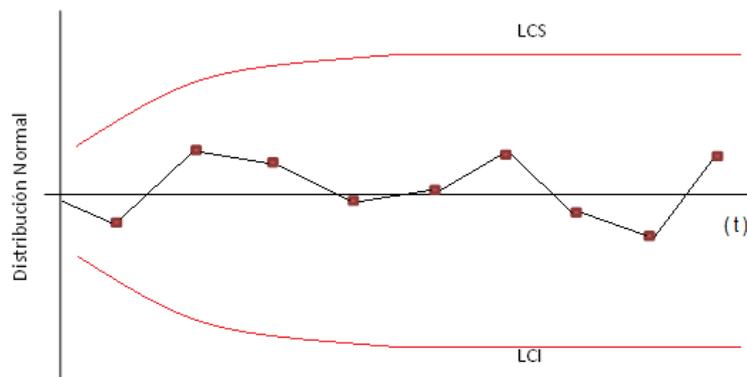


Figura 2.28: Gráfico de control EWMA. Elaboración propia (2018)

### Gráficos de control de Media Móvil (MM)

Al igual que los gráficos CUSUM y EWMA, los gráficos MM tienen memoria. Se basan en calcular una media móvil. Suponiendo una serie de muestras  $t$  de tamaño  $n$  con valores de medias  $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_t$  definiremos el valor de media móvil de alcance  $W$  como el valor:

$$M_t = \frac{\bar{x}_t + \bar{x}_{t-1} + \dots + \bar{x}_{t-W} + 1}{W}
 \tag{2.66}$$

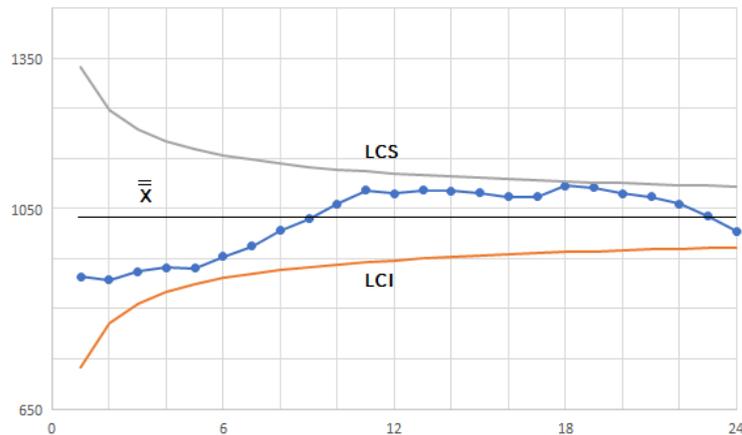


Figura 2.29: Gráfico de control de MM. Elaboración propia (2018)

En este tipo de gráficos varía el valor de la media conforme avanza el proceso, sustituyendo el valor más antiguo por la nueva media con el paso del tiempo. Considerando la hipótesis nula cierta, tendremos un valor de  $\mu_0$  tal que los límites de control vendrán dados por las expresiones siguientes para  $3\sigma$ :

$$LCS = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n \cdot W}} \quad (2.67)$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad (2.68)$$

$$LCI = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n \cdot W}} \quad (2.69)$$

La representación gráfica es de la forma que se puede ver en la figura 2.29 en la que los límites superior e inferior se cierran conforme el proceso avanza.

#### 2.8.4. Gráficos de control multivariante

Los gráficos que hemos visto hasta este momentos son gráficos de control en los que analizamos las variables de forma aislada, univariante, pero existe la posibilidad de estudiar las variables de forma conjunta empleando gráficos de control multivariante. Estos últimos son de gran utilidad en sistemas complejos y gracias al desarrollo informático se aplican en múltiples procesos complejos en los que existen correlaciones entre sus variables.

Su aplicación se extiende a múltiples áreas de actividad, tres de los más empleados son los procesos de Hotelling, el MCUSUM que es la variación del modelo CUSUM multivariante y el MEWMA que es un procedimiento EWMA multivariante. Todos ellos han sido analizados y comparados en variada literatura para múltiples aplicaciones tanto en procesos industriales como en el campo de la ingeniería o las ciencias sociales [133] [134] [135] [136].

En este apartado vamos a explicar el proceso de Hotelling por ser uno de los más difundidos desde que en 1947 fue postulado por el autor que le dio nombre H. Hotelling [137] y que se aplica tanto a procesos de trabajo en el sector textil [138] de forma individual como combinado con otros elementos matemáticos como la monitorización de procesos multivariante empleando red neuronal artificial Fuzzy

ARTMAP para la localización de causas asignables a los elementos fuera de control en el proceso [139] [140] o para mejorar el mantenimiento predictivo en buques mercantes [141].

### Procedimiento de Hotelling

La potencia de los medios informáticos actuales ha hecho que los procedimientos multivariante sean más fáciles de utilizar en el control de procesos donde se plantean correlaciones entre las variables implicadas. Como hemos dicho uno de los procesos más empleados es el de Hotelling o T de Hotelling, este nos permite el control de varias variable si bien, no permite la detección de cambios pequeños o medianos en el proceso. Es por ellos que se han realizado estudios en combinación con otros elementos matemáticos que mejoran su funcionamiento en la detección de cambios [142].

El proceso parte de considerar una serie de variables que queremos controlar al mismo tiempo de un proceso bajo control con un vector de medias  $\mu_0$  objetivo y que notaremos como  $p$ , pudiendo presentarse dos situaciones:

1. Aquellas en las que conocemos este vector de medias  $\mu_0$  y una matriz de covarianzas de las variables que notaremos como  $\Sigma$ .
2. Aquellas en las que no conocemos  $\mu_0$  y  $\Sigma$ .

Cuando conocemos  $\mu_0 = (\mu_{0,1}, \mu_{0,2}, \dots, \mu_{0,p})$  y la matriz de covarianzas  $\Sigma$  para un proceso bajo control podemos construir en cualquier momento  $t = i$  una matriz de medias  $\bar{X}_i$  al que asociaremos el estadístico de Hotelling [142]:

$$T_i^2 = n(\bar{X}_i - \mu_0)' \Sigma^{-1} (\bar{X}_i - \mu_0) \quad (2.70)$$

En la ecuación 2.70  $T_i^2$  sigue una distribución chi-cuadrado  $\chi^2$  con  $p$  grados de libertad es decir, estamos hablando de una distribución de Pearson de distribución continua. Cuando el proceso está bajo control se presenta la hipótesis  $H_0$  en la que el suceso presente es  $\mu_i = \mu_0$  por tanto, la probabilidad  $\alpha$  de que excedamos el valor crítico con  $T_i^2 > \chi_{p,\alpha}^2$  hace factible el uso de un único Límite de Control (L.C.) de la forma  $L.C. > \chi_{p,\alpha}^2$  (que no debemos confundir la LC que hemos empleado con anterioridad). Cuando superamos este L.C. diremos que el proceso está fuera de control. En la figura 2.30 podemos ver un gráfico de Hotelling en el que el proceso está controlado con respecto a su límite L.C. en rojo y, los valores del estadístico.

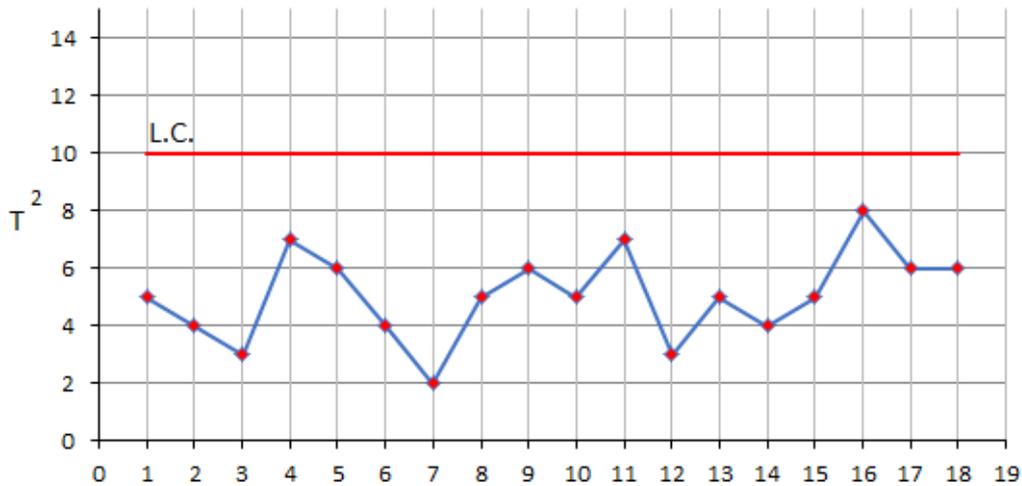


Figura 2.30: Gráfico del estadístico de Hotelling. Elaboración propia (2018)

En el caso que se presente la hipótesis  $H_1$ , tal que  $\mu_i \neq \mu_0$ , el estadístico  $T_i^2$  tendrá una distribución chi-cuadrado no central con  $p$  variables y valor de parámetro de descentrado:

$$\lambda = n(\mu_i - \mu_0)' \sum^{-1} (\mu_i - \mu_0) \quad (2.71)$$

si calculamos la raíz cuadrada de la ecuación 2.71 prescindiendo de  $n$  obtenemos el valor de la distancia entre dos vectores:

$$d = \sqrt{(\mu_i - \mu_0)' \sum^{-1} (\mu_i - \mu_0)} \quad (2.72)$$

tal que el parámetro  $\lambda$  depende únicamente del valor  $n$  y  $d$  cuando el proceso está fuera de control quedando la expresión de la siguiente forma:

$$\lambda = nd^2 \quad (2.73)$$

Cuando no conocemos los valores del vector  $\mu_0 = (\mu_{0,1}, \mu_{0,2}, \dots, \mu_{0,p})$  y la matriz de covarianzas  $\Sigma$  tenemos que emplear de la siguiente forma con el estadístico:

$$T_i^2 = n(\bar{X}_i - \bar{\bar{X}})' S^{-1} (\bar{X}_i - \bar{\bar{X}}) \quad (2.74)$$

En la ecuación 2.74 la matriz  $S$  representa las covarianzas desconocidas. Existen métodos de aproximar el valor del estadístico pero en nuestro caso no vamos a considerarlo. Sí diremos que como todo procedimiento estadístico tiene sus limitaciones y estas son fundamentalmente [143] la pérdida de capacidad para las variaciones pequeñas del vector, las variaciones en variables de forma individual o en un subconjunto, la pérdida de sensibilidad con el aumento de las variables  $p$  y aunque detecte variables fuera de control no es capaz de dictaminar cuales son las causantes.

### 2.8.5. Gráficos de control por atributos

Todos los gráficos vistos hasta este momento monitorizan variables, es decir controlan valores de las mismas cuantificando estas. Los gráficos de control por atributos monitorizan una característica de conformidad o no conformidad del proceso. Es una práctica habitual en evaluación de sistemas de comunicaciones como puede ser la monitorización del número de averías que se producen cada cierto tiempo  $t$  en un cable de fibra óptica o en la fabricación de componentes electrónicos [144], en campos como el análisis económico [145] o en la mejora de la eficiencia en procesos industriales [146].

Los cuatro tipos de gráficos que se emplean para efectuar este tipo de control son:

1. Gráficos de control tipo “p”: mide la proporción de no conformes sobre una muestra fija o variable.
2. Gráfico de control tipo “np”: determina el porcentaje de no conformes para una muestra fija.
3. Gráfico de control tipo “c”: cuenta el número de eventos defectuosos.
4. Gráfico de control tipo “u”: determina el número de ocurrencias por unidad producida.

Este tipo de gráficos permite monitorizar atributos de los elementos que estemos monitorizando en cualquier proceso productivo, así podemos dar el siguiente significado de “p” es porcentaje, “np” número de unidades defectuosas, “c” lo asociamos al conteo de unidades y “u” lo asociamos al número de defectos en cada pieza [147]. Veremos a continuación de forma sucinta su formulación extraída de los ejemplos presentados en la tesis de la referencia [148] documentos gubernamentales como el manual técnico del gobierno Chileno de la referencia [149] o manuales generales como el de la referencia [150].

#### Gráfico tipo “p”

Como ya hemos dicho este tipo de gráfico nos permite conocer el porcentaje de fallos en un grupo en el que consideramos muestras de tamaño  $n$ , valor que se suele considerar mayor o igual a 50 si bien, dependiendo del proceso este puede variar. La formulación para sus LCS, LCI y LC son las siguientes:

$$LCS_p = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p} \cdot (1 - \bar{p})}{n}} \quad (2.75)$$

$$LC_p = \bar{p}$$

$$LCI_p = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p} \cdot (1 - \bar{p})}{n}}$$

Donde:

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_m} \quad (2.76)$$

Siendo ese valor, relativo a cada muestra  $i$ , igual a  $p_i = \frac{np_i}{n}$ ; el valor de  $m$  es el número de muestras tomadas.

**Gráfico tipo “np”**

Se controla el número de fallos dentro de un grupo determinado, el tamaño de la muestra es constante y mayor o igual a 50 de forma general. Las ecuaciones para LCS, LCI y LC son los siguientes:

$$\begin{aligned} LCS_{np} &= n\bar{p} + 3\sqrt{n\bar{p} \cdot \left(1 + \frac{n\bar{p}}{n}\right)} \\ LC_{np} &= \bar{p} \\ LCI_{np} &= n\bar{p} - 3\sqrt{n\bar{p} \cdot \left(1 + \frac{n\bar{p}}{n}\right)} \end{aligned} \quad (2.77)$$

Donde:

$$\bar{p} = \frac{np_1 + np_2 + \dots + np_m}{m} \quad (2.78)$$

Siendo para cada muestra de forma aislada  $np$  el número de fallos y  $m$  es el número de muestras tomadas.

**Gráfico tipo “c”**

Lo empleamos para controlar el número de fallos  $c$  siendo la expresión de LCS, LCI y LC la siguiente:

$$\begin{aligned} LCS_c &= \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} \\ LC_c &= \bar{c} \\ LCI_c &= \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} \end{aligned} \quad (2.79)$$

Donde:

$$\bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_m}{m} \quad (2.80)$$

Siendo  $c$  el número de fallos de cada muestra y  $m$  el número de muestras.

**Gráfico tipo “u”**

Lo empleamos para controlar el número de fallos por unidad  $u$  siendo la expresión de LCS, LCI y LC la siguiente:

$$\begin{aligned} LCS_u &= \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \\ LC_u &= \bar{u} \\ LCI_u &= \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \end{aligned} \quad (2.81)$$

Donde:

$$\bar{u} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_m} \quad (2.82)$$

Siendo el valor de LC ( $u = \frac{c}{n}$ ) para cada muestra individual y  $m$  el número de muestras.

Los gráficos de control por atributos son beneficiosos en procesos complejos en los

que pueden existir muchas variables implicadas en cada fallo potencial, permitiendo mostrar de forma más clara un resultado final de un atributo o característica del proceso que queremos controlar por contra, hay que tener presente que solo constata la existencia de un problema pero no permite dirimir posibles soluciones y, emplearlos sin determinar de forma segura la capacidad o desempeño del proceso, inducirá a errores [151].

### 2.8.6. Medida del desempeño por el procedimiento ARL

El “Average Run Length” o valor promedio de recorrido (ARL) es un procedimiento muy empleado para conocer el desempeño de los gráficos de control. Básicamente mide la velocidad de detección del cambio en un proceso cuando lo estamos monitorizando con este tipo de elementos. Está directamente relacionado con el valor promedio de muestras necesarias en un proceso para que aparezca una señal fuera de control [152].

Como ya hemos comentado, los gráficos de control no son más que una representación secuencial de errores asociados a procesos denominados de Tipo I y de Tipo II. Estos errores consisten básicamente en el rechazo de la hipótesis  $H_0$  cuando esta es cierta y, en la aceptación de la misma  $H_0$  cuando es falsa.

La  $H_0$  es la que acepta el proceso bajo control por lo que, el error de Tipo I se presentará cuando el proceso está fuera de control en el gráfico y, realmente si está controlado. Esto es lo que se denomina Falsa Alarma. La expresión ARL para este caso se denota como  $ARL_0$  siendo su expresión  $ARL_0 = \frac{1}{p}$  donde  $p$  representa la probabilidad de cometer este error de Tipo I. Cuando conocemos o especificamos esta probabilidad la escribiremos como  $\alpha$ .

Lo deseable en cualquier proceso es que el valor de  $ARL_0$  sea lo más grande posible pues esto indicará que el recorrido es grande y por tanto el número de fallos o puntos fuera de control presenta pocas “falsas alarmas” [152].

En el caso que el proceso esté fuera de control el ARL será necesariamente pequeño y, su significado es que, si es pequeño, detecta de forma rápida los fallos del proceso. Su expresión en esta situación es  $ARL_1 = \frac{1}{p}$  siendo  $p$  en este caso la probabilidad de proceso fuera de control haciendo falsa la  $H_0$ . Esta probabilidad se calcula como complemento denominado  $\beta$  asociado a un error de Tipo II. De forma evidente, el valor mínimo de ARL será  $ARL = 1$  lo que indica que  $p$  es también igual a uno ( $P = 1$ ) [152].

Siempre buscaremos reducir el error al máximo y, de forma sencilla, estos se reducen aplicando uno o varios de los criterios siguientes para errores de Tipo I como es establecer las relaciones y correlaciones correctas entre las variables, evitando las improvisaciones, reducir el número de test estadístico en el proceso, depurar la base de datos para eliminar por ejemplo valores extremos y emplear valores de  $\alpha$  reducidos (0,01 ó 0,001). Cuando se trate de errores de Tipo II, es recomendable tomar muestras mayores, evaluar la potencia del estadístico empleado, aumentar el tamaño del fallo que queremos localizar y, evidentemente, aumentar el valor de  $\alpha$ , lo que reducirá el complemento [153]. Estos análisis de contraste de hipótesis estudiados ya por Fisher en los años 30 del siglo XX [154] ha ido ampliándose pero fundamentalmente, buscan conocer la validez de la  $H_0$ . Para determinar el valor de ARL se suelen emplear dos procedimientos:

- Empleando una expresión analítica de la probabilidad  $P$ .

- Calculando un valor aproximado del mismo por medio de la simulación del proceso.

Fundamentalmente, si consideramos un proceso bajo control con  $ARL = \frac{1}{\alpha}$  dentro del  $3\sigma$  tendremos un valor de  $\alpha = 0,03$  lo que nos da un número de muestras de 33,3; si bajamos el nivel de calidad implicará que hay que aumentar el número de muestras necesario que denominaremos  $k$ . De esta forma podemos expresar lo anteriormente expuesto de la siguiente forma y para un proceso controlado (P.C.):

$$P.C. ARL_0 = \sum_{k=1}^{\alpha} k \cdot (1 - \alpha)^{k-1} \cdot \alpha = \frac{1}{\alpha} \quad (2.83)$$

Siendo en la ecuación 2.83 el recorrido  $RL = (1, 2, 3, 4, \dots, k)$  de las muestras y las probabilidades de cada una de ellas  $\alpha = (\alpha, (1 - \alpha)\alpha, \dots, (1 - \alpha)^{k-1}\alpha)$  representado así, el valor de la probabilidad que el valor dado se encuentre dentro de los límites de control  $prob(\bar{X} \notin [LCI, LCS] P.C.) = (1 - \alpha)$  y la  $prob(\bar{X} \in [LCI, LCS] P.C.) = \alpha$  de no estar dentro de los límites de control.

De igual forma cuando consideramos que, el proceso, está fuera de control (F.C.) tendremos que:

$$F.C. ARL_1 = \sum_{k=1}^{\beta} k \cdot \beta^{k-1} \cdot (1 - \beta) = \frac{1}{1 - \beta} \quad (2.84)$$

Siendo en la ecuación 2.84 el recorrido  $RL = (1, 2, 3, 4, \dots, k)$  de las muestras y las probabilidades de cada una de ellas  $\beta = ((1 - \beta), \beta(1 - \beta), \dots, \beta^{k-1}(1 - \beta))$  representado así, el valor de la probabilidad que el valor dado se encuentre dentro de los límites de control  $prob(\bar{X} \notin [LCI, LCS] F.C.) = \beta$  y la  $prob(\bar{X} \in [LCI, LCS] F.C.) = (1 - \beta)$  de no estar dentro de los límites de control.

### 2.8.7. Algoritmos exactos y aproximados

Un algoritmo es, básicamente, un conjunto de ordenes secuenciales que usamos para resolver problemas. Diremos que es exacto cuando garantiza una solución óptima así, por ejemplo, si quiero saber el valor de la medida de la hipotenusa  $a$  de un triángulo rectángulo de catetos  $b$  y  $c$  puedo conocerla de forma exacta al aplicar la regla del conocido teorema de Pitagoras  $a^2 = b^2 + c^2$ .

Diremos que el algoritmo es aproximado cuando devuelve un resultado en el entorno de la solución óptima es decir, obtenemos un resultado máximo o mínimo y, por ejemplo, los algoritmos heurístico son elementos que empleamos como estrategia de pensamiento que nos puede llevar a una posible solución, aunque no la garantizan pero, sí permiten aproximar esta de forma probabilística y más rápidamente que con algoritmos exactos por ello, y por ser un elemento que emplea estrategias muy diferentes a los exactos, trataremos estos de forma más profunda al ser una herramienta muy difundida para la solución de problemas complejos que necesitarían de elevados tiempos de preparación, altos costes económicos y tiempos de proceso.

### 2.8.8. Heurística y metaheurística

Este tipo de algoritmos nos permiten tomar atajos para la toma de decisiones valorando los sucesos elaborando un estudio matemático aproximado del problema

que nos planteemos. El uso de la metaheurística se ha ido implantando desde los años 90 del pasado siglo por ofrecer soluciones de mayor calidad que otros métodos heurísticos clásicos aunque requieran de mayores tiempos para su planteamiento y ejecución. Con respecto a las heurísticas clásicas, muy empleadas en ciencias sociales en investigación cualitativa [155] [156], se pueden presentar diferentes formas de aproximación a los problemas y tipos de sesgo que pueden presentarse al emplearlas en el análisis de los problemas. De forma resumida tenemos:

1. Heurístico de representatividad: es aquel que nos lleva a asociar algún suceso que consideramos factible y más probable en presencia de algún otro suceso o sucesos, asociados al primero con menor probabilidad. Un ejemplo de este heurístico puede ser considerar que cualquier sistema energético que embarquemos que sea más eficiente desde el punto de vista energético, será el más respetuoso con el medio ambiente porque sus emisiones de GEI serán menores, lo que generalmente es cierto pero puede suceder que esto no sea así. En este procedimiento se pueden producir los siguientes sesgos o errores:
  - a) Insensibilidad a las probabilidades previas: que se da cuando asignamos una probabilidad a un suceso nuevo que se considera representativo y no lo es.
  - b) Insensibilidad del tamaño de la muestra: dada la frecuencia real del suceso o sucesos se considera que se va a reproducir esto cuando se emplean una amplitud de observaciones muy reducida.
  - c) Falacia de conjunción: un axioma de probabilidad, afirma que una probabilidad de sucesos conjunta, será igual o menor a la probabilidad de cada suceso por separado.
  - d) Insensibilidad del fenómeno de regresión a la media: que es un fenómeno que se da en las observaciones en las que a medidas de valor más alto siempre la va a seguir medidas más bajas y viceversa lo que llevará a que se aproximen a la media.
2. Heurístico de disponibilidad: en este caso basamos la decisión de certeza sobre los primeros sucesos o suceso que se produce, considerándolos solución por la extrañeza de la observación o particularidad del mismo. Un ejemplo puede ser considerar que los sistemas energéticos embarcados que funcionan más tiempo son susceptibles de averiarse más y perder sus características de eficiencia lo que, por otro lado, no tiene porqué ser cierto. La ventaja de este procedimiento radica en que solemos tener mayor cantidad de información que en el caso anterior. Los sesgos de este heurístico son los siguientes:
  - a) Sesgo de imaginación: se produce al presentarse un problema del que no disponemos de información previa y tenemos que imaginárnosla para poder establecer una matriz de probabilidades de éxito o fracaso.
  - b) Correlación irreal: cuando al concurrir dos sucesos planteamos su correlación como real siendo este planteamiento incorrecto.
  - c) Sesgo de recuperación: sobre la base de información previa y la frecuencia de sucesos en el problema presente que nos hacen asociar las certezas pasadas a los sucesos presentes sin existir relación alguna entre estos.

- d) Sesgo de conjunto de búsqueda: cuando los conjuntos de búsqueda empleados no son suficientemente precisos y por tanto, los patrones de recuperación de la información empleados, no se ajustan al problema estudiado.
3. Heurístico de anclaje y ajuste: esta estrategia se basa en emitir juicios sobre la base de algún valor inicial que, con posterioridad, se va ajustando para alcanzar la respuesta final la cual, estará sesgada al valor inicial pues es el que se ha considerado de entidad en la solución del problema que tengamos planteado. Es el caso de considerar el funcionamiento de algún sistema como idóneo en todo momento y comparamos contra este el resto de sucesos, esto puede ser cierto en un primer momento pero puede cambiar y no ser detectado. Los sesgos más comunes son los siguientes:
- a) Sesgo de costo hundido: cuando se ancla la decisión a elementos pasados descartando el análisis de los posibles cambios que se producen en el problema.
  - b) Sesgo de anclaje: cuando la evaluación previa del valor inicial es errónea de partida por sobrevalorar su influencia en el caso estudiado.
  - c) Sesgo de confirmación: cuando se emplean pruebas y argumentos ignorando la evaluación de pruebas y argumentos que no respaldan la decisión.
  - d) Sesgo retrospectivo: al valorar elementos desde las consecuencias considerando que los elementos o sucesos considerados son evidencia del resultado asumido de forma errónea.

Para efectuar análisis cuantitativos también empleamos la heurística en base a algoritmos. Estos algoritmos son, fundamentalmente, reglas matemáticas que buscan aproximar una solución al problema que se plantee. Se denominan metaheurísticos a aquellos desarrollados a nivel superior con herramientas de computación que nos permiten dar soluciones a problemas para los que no existe una formulación exacta o un heurística que den una solución satisfactoria. F. Glover, en 1986, acuñó este término y lo definió como:

*“procedimiento maestro de alto nivel que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimización local”* [157].

En matemáticas se han desarrollado algoritmos heurísticos y metaheurísticos que son de aplicación en múltiples campos como el análisis de rutas de transporte por carretera [158], modelado climático, modelado de sistemas energéticos, en control de enfermedades [159] [160] [161] o, para la optimización como parte de la investigación operativa [162].

En los últimos años se ha incrementado el interés por cómo la naturaleza da solución a diversos problemas como son: búsqueda de fuentes de alimento, organización de conjuntos de animales o insectos, atracción y repulsión de cargas sobre los que, los algoritmos metaheurísticos, dan buenos resultados [163], al permitirnos simular comportamientos naturales básicos para solucionar tareas complejas.

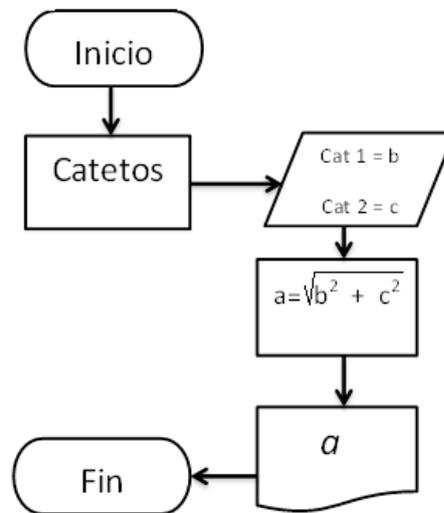


Figura 2.31: Funcionamiento de un algoritmo. Elaboración propia (2018)

En la figura 2.31 podemos ver de forma sencilla como se organiza un algoritmo en pasos sencillos. Tomando como ejemplo el arriba explicado del teorema de Pitágoras (exacto) si queremos conocer la hipotenusa  $a$  conociendo los catetos  $b$  y  $c$ , entonces puedo aplicar el teorema de forma inmediata y conocer el valor de  $a$  finalizando el proceso y dando la solución al problema. es decir, de forma simple se trata de seguir una serie de pasos ordenados que den un resultado satisfactorio. En el campo de la metaheurística [164], algunas de las técnicas más empleadas y conocidas son las siguientes en el campo de la ingeniería:

- Algoritmos de hormigas: se basa en la construcción de un modelo heurístico que se asemeja al funcionamiento real de las colonias de hormigas y a la forma de comunicarse estas en los caminos que marcan entre el hormiguero y la fuente de alimento; las hormigas en su búsqueda del camino más corto van descargando feromonas que pueden ser detectadas por cualquier individuo de la colonia, las pistas que son reforzadas por muchas hormigas serán las que se detecten mejor y se convertirán en la mejor de las rutas. Se emplea de forma profusa en problemas de combinatoria complejos. En este tipo de algoritmos se genera una colonia de hormigas artificiales que se encarga de buscar la solución al problema planteado, es decir, el camino más corto de un punto A a un punto B, descargando sus feromonas (información) e intercambiando esta así, con este intercambio, se puede optimizar la ruta de A a B ya que, la existencia de las feromonas en mayor cantidad, marcará el camino ideal a seguir por las hormigas artificiales creadas [165].
- GRASP: Greedy Randomised Adaptive Search Procedures (GRASP) que podemos traducir como Procedimientos ávidos o golosos de búsqueda adaptativa aleatoria. Estos basan su trabajo en la búsqueda por vecindad de las soluciones. Trabajamos en dos etapas, una de construcción del algoritmo y una segunda de mejora local de la solución es decir, buscamos la solución por pasos, añá-

diendo en cada iteración algún componente a la solución final del problema [166].

- **Búsqueda tabú:** parte de la búsqueda local de soluciones se inicia con una solución factible que, es examinada con el vecindario de la misma escogiéndose el vecino cuya función objetivo sea la mejor para la solución del problema. El programador del algoritmo es el encargado de definir los requisitos de selección que siempre deben escapar de obtener valores mínimos o máximos locales que falsearán el resultado óptimo del algoritmo. así, en ocasiones se selecciona un vecino peor que la solución aportada para escapar de caer en la localización de la solución final [167] [168].
- **Recocido simulado:** busca soluciones a los problemas en un entorno dado empleando soluciones vecinas y se basa en las tecnologías metalúrgicas del recocido en el que se procede a rebajar las temperaturas de los materiales de forma controlada para modificar la estructura del material. su aplicación en el campo de la ingeniería es muy variada [169].
- **Algoritmo Genético / Genetic Algorithm (GA):** que imitan procesos naturales de adaptación y evolución y de estos hablaremos en el apartado siguiente por ser de gran ayuda en el campo de la EE [170].
- **Redes Neuronales Artificiales (RNA):** las RNA son elementos de procesamiento de la información que trabajan como una red neuronal biológica, es decir, como procesaría la información nuestro cerebro a la hora de abordar algún problema. Está directamente relacionado con la inteligencia artificial en la que se busca detectar las deficiencias presentes en el algoritmo para, mediante el aprendizaje y la retroprogramación aprender a dar la solución óptima de forma autónoma y ejecutando múltiples tareas a un tiempo [171].

Cuando hablamos de optimización, los algoritmos más empleados son el de recocido simulado; búsqueda tabú; GRASP, y algoritmos genéticos. Veremos a continuación en más profundidad los GA y las redes neuronales por ser dos de los procedimientos más empleados en el campo de la ingeniería naval y en la EE en los últimos años [172] [170].

### 2.8.9. Algoritmos genéticos (GA)

En el campo de la EE, al igual que en procesos en los que el número de variables empleadas es elevado, se aplican algoritmos que permitan modelar el comportamiento de los sistemas para su optimización en múltiples áreas como ingeniería, biología o economía [173] [174] cuando se presentan problemas complejos.

Este tipo de algoritmos se aplican con la intención de obtener una respuesta que se pueda asemejar al comportamiento evolutivo de los organismos vivos. Sus cimientos los estableció J. Holland, quien definió su funcionamiento básico en 1975 [175] hoy en día hay una amplia bibliografía sobre su aplicación, desde manuales compendio de uso [176] hasta artículos con aplicaciones específicas en distintas áreas de conocimiento como la ingeniería, donde se combina en muchos procesos multiobjetivo [177].

El proceso sigue una serie de pasos ordenados donde asimilamos el problema a procesos genéticos en los que se produce combinación, recombinación y mutación de los genes como se da en las células reales. Los pasos fundamentales en la aplicación de un GA sencillo son:

1. Partimos de un punto inicial  $t = 1$ , donde generaremos una población  $N$  de forma aleatoria  $(c_1, c_2, c_3, \dots, c_n)$  que es codificada en lenguaje binario  $\{0, 1\}$  que será la primera generación de individuos y las posibles soluciones iniciales a nuestro problema  $C_1$ , procediendo a evaluar la aptitud de estas con nuestra función de aptitud o "fitness" previamente establecida  $f(x) = f\{c_i, \dots, c_n\}$  y poder comprobar su valía.
2. Por medio del cruzamiento crearemos una población de descendientes dos a dos que, denominaremos  $C_t$  con soluciones  $(c_1, \dots, c_k)$  y que se añadirán al nuevo grupo de descendientes  $C_t$  tras aplicar el operador que hayamos considerado de cruzamiento que, por lo regular, no se aplica de forma general a todos los emparejamientos, considerando para los cruces, una probabilidad de entre 0,5 y 1,0 del total.
3. De igual forma que en el cruce, aplicaremos una tasa de mutación predefinida y así, procederemos a mutar cada solución obtenida o hijo de forma individual obteniendo así las soluciones mutadas  $(c'_1, \dots, c'_k) \in C'_t$ .
4. Tras la mutación procederemos a evaluar las soluciones nuevamente. Si se cumple el criterio que nos hallamos marcado para detener el proceso de evolución, pararemos el mismo pues hemos encontrado la solución óptima para el problema, si esto no es así tendremos que fijar un momento  $t = t + 1$  y repetiremos el procedimiento desde el punto 2.
5. Repetiremos el proceso y, volveremos a seleccionar nuevamente  $N$  soluciones basadas en el cumplimiento de la función y crearemos una nueva población  $C_{t+1}$ .
6. Volvemos a aplicar la función de aptitud  $n$ -veces hasta obtener la mejor solución para nuestro problema.

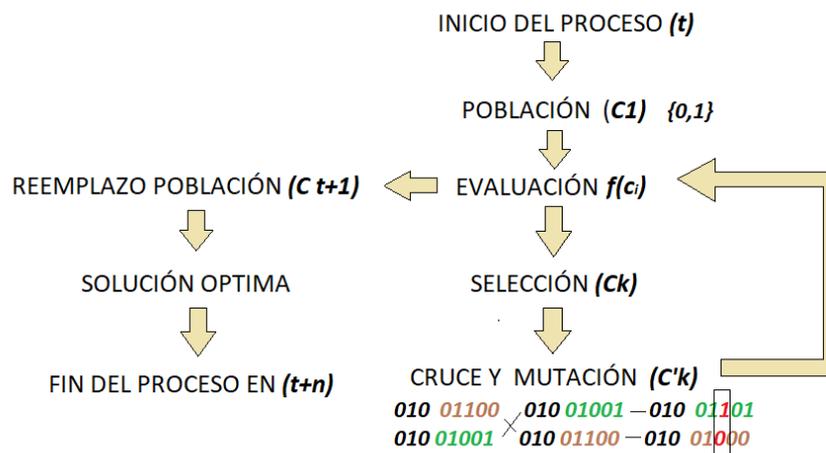


Figura 2.32: Funcionamiento de un AG simple. Elaboración propia (2018)

De forma gráfica, en la figura 2.32 partimos de una población o muestra que codificaremos de forma binaria por lo regular con (1;0), sobre esta aplicaremos una función de aptitud para evaluarlas respecto de  $t$ .

Después de aplicar la función, procedemos a seleccionar los elementos de la muestra que mejor se ajusten a nuestra solución para cruzarlos y mutarlos siguiendo las pautas que se hayan marcado; en este caso de la figura se cruza los 5 últimos genes de la cadena y, como objetivo de mutación se ha marcado cambiar el sexto gen de la cadena; esto último se hace para evitar la pérdida de continuidad en el proceso que establecemos con la función de aptitud.

Volvemos a aplicar la función de aptitud  $n$ -veces hasta obtener la solución. La función de aptitud debe establecerse de forma cuidadosa, puesto que debe permitir una evaluación real de las muestras evitando soluciones falsas que nos alejen de la solución verdadera.

Para saber si el GA se ha planteado correctamente se suele emplear el concepto de convergencia introducido en 1975 por De Jong [178] donde la adaptación media de los individuos se extiende a la práctica totalidad de estos y, el mejor de ellos irá incrementando si adaptación al óptimo requerido es decir, que la tendencia será la de la uniformidad por lo que, se considera alcanzada la convergencia cuando un gen es igual en el 95% de los individuos de la población.

Ejemplos de aplicación en el campo de estudio de esta tesis son entre otros para crear modelos de maniobra de buques con piloto automático en los que influyen gran cantidad de variables y que hoy en día, son importantes en el desarrollo de los entornos 4.0 en este campo [179].

### 2.8.10. Modelos y regresiones

El avance y desarrollo de la informática nos permite elaborar modelos de realidades altamente complejas que nos han llevado a la cuarta revolución industrial denominada revolución 4.0, y que ha puesto de moda el empleo de la Inteligencia Artificial (IA) en todos los campos de la actividad humana al tratar las organizaciones desde la perspectiva de las redes [180]. Los conceptos de modelo y regresión,

este último (regresión lineal) ya lo introdujimos en el apartado 2.8.1 sobre inferencia estadística, veremos ahora una definición más amplia de estos conceptos que son interesantes a la hora de analizar datos de variables.

## Modelos

Cuando queremos crear un modelo, vamos incluyendo las distintas características que observamos de su realidad así, en el caso de un buque, su modelado, requiere de una cantidad de variables y restricciones que es difícil incluir en su totalidad en un modelo sencillo y caso de hacerlo, daría como resultado un modelo altamente complejo, difícil de usar y que requerirá de recursos elevados tanto económicos como personales y de tiempo.

Esto nos obliga a estudiar el buque de guerra como un todo y no de sus partes, es decir, requiere de un análisis dinámico de sistemas en base a variables que se relacionan y permiten hacer inferencia en base a estas relaciones. Este tipo de análisis dinámicos son ampliamente utilizados en ingeniería, biología, medicina, economía o ciencias sociales mediante el uso de algoritmos de modelizado como los comentados con anterioridad [181].

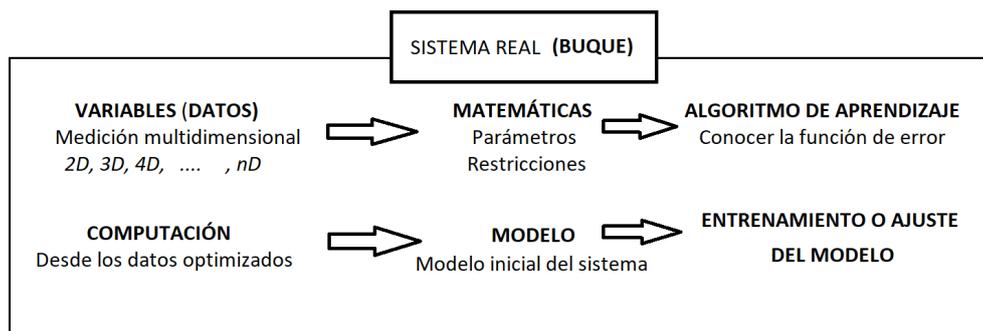


Figura 2.33: Obtención del modelo. Elaboración propia (2018)

En la figura 2.33 podemos ver el proceso de elaboración de un modelo de un buque, el buque es la realidad, es el sistema complejo que queremos modelar de forma sencilla. lo primero que tendremos que hacer será establecer una base de datos de las variables que consideremos más importantes, estos datos deben ser analizados desde la matemática empleando restricciones al modelo y parámetros que nos ayuden a aproximar el mismo además, con restricciones y parámetros, podremos elaborar una función de error que nos hablará de lo acertado o no que es el modelo el cual, mediante la computación de los datos optimizados, darán como resultado un modelo inicial que podremos entrenar o ajustar de forma iterativa para mejorar y reducir progresivamente el error.

Para evitar los elevados costes que puede suponer lo anterior, se hace necesario recurrir a la estadística que nos permite crear modelos probabilísticos más sencillos y menos complejos de elaborar y facilitando el análisis de los datos y, mediante la inferencia, presentar aproximaciones válidas para nuestro problema de forma rápida.

Como ya hemos dicho, los modelos están sujetos a errores o sesgos que pueden venir dados por las distintas situaciones ya comentadas en el apartado 2.8.8 y que, por tanto, deben ser controlados para no cometer fallos que hagan inviable o inútil el modelo por no ajustarse a la realidad del sistema analizado.

### Regresiones

La regresión lineal puede considerarse el algoritmo de aproximación más sencillo que podemos definir para dar solución a un problema. Este nos permitirá elaborar modelos de los fenómenos observados sencillos para facilitar la comprensión del funcionamiento de los procesos que estudiemos. Sus posibilidades son:

- **Regresión lineal simple:** básicamente y de forma matemática lo que buscamos es una recta de la forma  $mx+b = y$  en la que su término independiente  $b$ , indica la altura que esta al eje  $y$  ; por otro lado tenemos la pendiente que nos da la relación entre las variables  $x$  e  $y$ . en la ilustración 2.34 podemos ver una nube de puntos que podemos aproximar de forma sencilla mediante una recta.

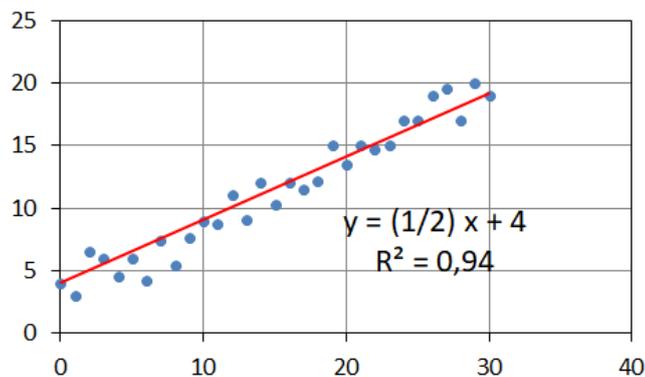


Figura 2.34: Modelo de regresión lineal. Elaboración propia (2018)

Como hemos comentado con anterioridad, hay que considerar el error que producimos al aproximar la solución, por ello, generalmente, se expresa la ecuación de la recta de la forma:  $y = mx + b + \varepsilon$  siendo  $\varepsilon$  el valor que representa el error como promedio de los residuos de la variable. Este valor resulta de resolver el valor promedio de los restos de la variable, es decir de aplicar:

$$\varepsilon = \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (2.85)$$

Donde el sumatorio representa la suma de las diferencias del valor de la función del modelo de regresión y el valor real dado.

- **Regresión lineal múltiple:** cuando el número de variables se incrementa la ecuación de regresión se complica, así para el caso de tres dimensiones, el más sencillo de este grupo, en lugar de una recta obtendremos un plano, con iguales características que el anterior.

En la figura 2.35 podemos ver este ejemplo donde, generalizando, formularemos la ecuación para dos variables dependientes  $y = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2$  donde

$w_0$  es el término independiente y  $w_1, w_2$  son los factores o coeficientes de peso de las variables  $x_1, x_2$ .

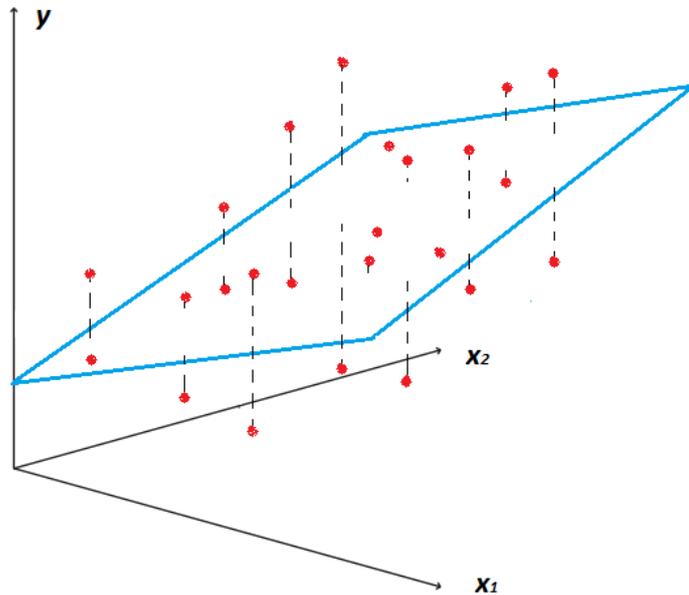


Figura 2.35: Modelo de regresión lineal 3D. Elaboración propia (2018)

En problemas complejos necesitaremos más de 3 dimensiones, tanto para variables cualitativas como cuantitativas. En este último caso la fórmula general para una regresión multilineal con  $n$  variables de la ecuación del hiperplano dada por:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= w_0 + w_1x_{11} + w_2x_{12} + w_3x_{13} + w_4x_{14} + \dots + w_nx_{1n} & (2.86) \\
 y_2 &= w_0 + w_1x_{21} + w_2x_{22} + w_3x_{23} + w_4x_{24} + \dots + w_nx_{2n} \\
 \dots &= \dots\dots\dots \\
 y_n &= w_0 + w_1x_{n1} + w_2x_{n2} + w_3x_{n3} + w_4x_{n4} + \dots + w_nx_{nn}
 \end{aligned}$$

El sistema anterior puede escribirse de forma vectorial como un conjunto de matrices expresado como:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & \dots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} & \dots & x_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_0 \\ w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \dots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (2.87)$$

Que de forma simplificada podemos escribir como:

$$Y = XW \quad (2.88)$$

Sabemos que es necesario conocer el error y así, para poder ver la bondad de las soluciones modeladas con respecto a los valores reales de las variables,

haremos modificaciones sobre los parámetros o pesos asignados en la matriz correspondiente. Si tomamos la figura 2.34 y la fórmula del error 2.85, podremos establecer una relación basada en las diferencias entre los valores reales  $y_R$  y los del modelo  $y_M$  como valor medio. Si consideramos el valor al cuadrado de estas diferencias, que denotaremos como  $R^2$ , obtenemos el error cuadrático medio en su forma vectorial, el cual, penaliza los puntos más alejados que los más próximos al modelo. Así podemos escribir este error en forma matricial como:

$$(Y - WW)^T(Y - XW) = Y^T Y - W^T X^T Y - Y^T W^T + W^T X^T XW \quad (2.89)$$

Para minimizar el error, tendremos que calcular la derivada de la fórmula 2.89, lo que nos permitirá conocer el valor mínimo del error cuadrático medio dado por la expresión:

$$-2X^T Y + 2X^T XW = 0 \quad (2.90)$$

En esta expresión podemos despejar el valor de los parámetros que minimizan el error y que mejor aproximan el modelo así obtenemos:

$$W = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (2.91)$$

Esta ecuación nos permite conocer los parámetros de forma exacta. El Problema que se nos plantea es que el cálculo matricial puede ser algo farragoso y lento aunque lo hagamos apoyándonos en la computación de los datos.

Para facilitar la velocidad de cálculo se suele recurrir al método del descenso del gradiente. Este algoritmo es de los más empleados en IA. Este trabaja sobre los parámetros de cualquiera de los modelos que hayamos desarrollado como expresión de una realidad.

Es importante tener presente la definición de las funciones denominadas no convexas. Es decir, son ecuaciones en las que se presentan una serie de mínimos locales de los que queremos conocer el mínimo absoluto.

Una representación gráfica puede ser una superficie como la de la figura 2.36 que puede asemejarse un tren de olas en el mar. Los parámetros de nivel los conoceremos calculando las derivadas parciales de cada dimensión desde el punto desde el que partamos lo que nos indicará la pendiente de la ola, el conjunto de los dos vectores obtenidos en este caso con las derivadas parciales nos dan el gradiente que nos indica el sentido ascendente de la ola, de esta forma cambiando el signo de este podemos saber el sentido y dirección descendente y, como lo que queremos es bajar por la ola, necesitaremos buscar el mínimo para llevar a cero la derivada parcial en el punto, de esta forma sabremos que estamos en un punto de mínimo local. En la figura 2.36 vemos representados los valores de las derivadas en verde y rojo y, el sentido de descenso del valor del gradiente en negro.

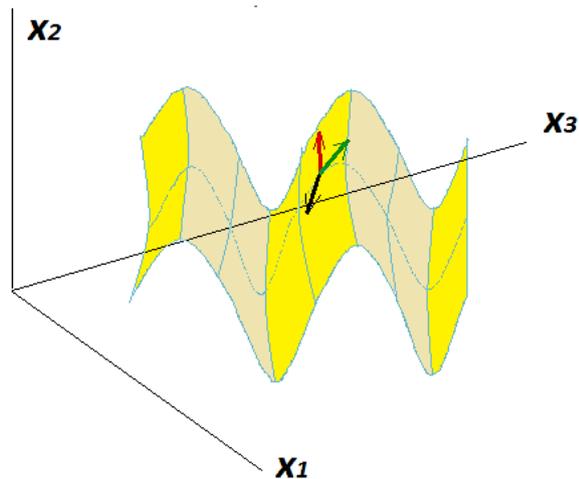


Figura 2.36: Función no convexa. Elaboración propia (2018)

- Regresiones no lineales:** en este tipo de regresiones estamos obligados a estimar los parámetros de nuestra ecuación o ecuaciones, buscando también minimizar el error que se nos puede producir debido a esta estimación. Para poder hacer esto tendremos que buscar una función que se ajuste a nuestros criterios iniciales para la cual, tendremos que calcular sus derivadas parciales respecto de las variables estudiadas, resolviendo el sistema de ecuaciones obtenido para ecuaciones no lineales. De forma más sencilla podremos obtener los parámetros mediante técnicas de optimización numérica. Generalmente, cuando no podemos hacer una regresión lineal podemos intentar linealizar las ecuaciones que obtengamos. De forma general la regresión no lineal aplicada a un modelo que queramos construir responderá a una función de la forma:

$$y = f(x, \theta) + \varepsilon \quad (2.92)$$

Donde  $x, y$  son variables multidimensionales afectadas por una serie de parámetros desconocidos que hemos notado como  $\theta$  respecto de los que, la función  $f$  es no lineal y  $\varepsilon$  es el error.

Debemos tener cuidado en el tratamiento de los modelos generados, ya que es fundamental comprobar la realidad de la no linealidad de las ecuaciones, es decir, que el planteamiento no permita producir un modelo multilineal como un polinomio que puede ser tratado de esta forma erróneamente.

Sin más profundidades, debemos plantearnos a la hora de generar el modelo, la posibilidad de producir la linealización del mismo, como se puede hacer con polinomios del tipo:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2.93)$$

Donde tenemos linealidad respecto de los parámetros desconocidos  $a, b, c$  y las variables serán  $x, y$  produciendo un sistema multilineal resoluble de forma sencilla.

Otro tipo de ecuaciones de regresión no lineal que se pueden linealizar de forma sencilla son las que se presenten con la forma siguiente:

$$y = a \cdot e^{bx} \quad (2.94)$$

La ecuación 2.94 puede ser linealizada de forma sencilla aplicando logaritmos a ambos lados del paréntesis y así obtenemos:

$$\ln(y) = \ln(a) + bx \quad (2.95)$$

Obteniendo así una ecuación lineal sencilla de nuestro modelo donde damos una función  $\ln(y)$  lineal en los parámetros y variable  $x$ . En ambos casos no hemos tenido presente el error para mayor claridad de las aproximaciones que hacemos para la linealidad de las ecuaciones. Otra forma de aproximar la ecuación es aproximar de forma logarítmica:

$$y = a \cdot \ln(x) + b \quad (2.96)$$

De forma general no existe un procedimiento único o mejor de estimación de los parámetros además de los ya explicados de mínimos cuadrados o de reducción del gradiente, podemos aplicar otros como son los Método de Montecarlo (MC) cuando el  $\varepsilon$  es conocido, para las observaciones se puede aplicar el método sobre la media de los resultados y su desviación estándar. esto nos permitirá ajustar una curva sobre la estimación de los parámetros del sistema. las ecuaciones 2.93, 2.94 y 2.96 pueden ser expresadas de forma matricial intercambiado  $x$  e  $y$  por las matrices correspondientes  $X$  e  $Y$ .

Existe numerosas referencias bibliográficas de aplicación de estos procedimientos tanto en economía [182] como en EE [183].

## 2.9. Sistema, variable y modelado

Definiremos sistema como el conjunto de elementos que funcionan como un todo en base a una serie de relaciones que se establecen entre sus partes así, podemos hablar de sistema económico, sistema educativo, sistema mecánico o sistema energético, los cuales, por su complejidad, se abordan como un todo y no de sus partes aisladas. Podemos encontrar ejemplos de análisis de sistemas complejos en campos tan dispares como el económico, mecánico o energético [183] [184] [185]. De forma general, consideraremos las definiciones empleadas en econometría para las variables del sistema en las que, dependiendo cómo establezcamos las relaciones entre éstas, tendremos dos tipos de variables:

1. Exógenas: variables aleatorias no predecibles del sistema.
2. Endógenas: variables predecibles del sistema.

Una variable se considera exógena cuando no es fácilmente predecible y, por tanto, difícilmente controlable; por el contrario, se considera que una variable es endógena si es controlable y así predecible de forma sencilla [186] [187]. Extrapolando esta definición a cualquier sistema general podemos decir, en primera aproximación, que tendremos un grupo de variables que deberán ser analizadas de forma estadística, por su carácter aleatorio e independiente, y otras que pueden ser analizadas empleando elementos determinísticos que son dependientes.

Todos los sistemas, sus variables y relaciones, pueden ser modelados desde dos perspectivas generales; una primera de carácter estático, en el que las variables implicadas en el estudio nos ofrecen una visión puntual con información sobre máximos

y mínimos y, la segunda, una forma dinámica en la que es necesario plantearse el estudio de las variables que forman nuestra base de datos de una forma dinámica respecto al dominio del tiempo ( $t$ ).

El análisis dinámico nos obliga a considerar también el concepto de estabilidad del sistema, es decir, analizar si el sistema se comporta de forma estable alcanzando un punto de régimen permanente en algún momento o sí, por el contrario, no es capaz de alcanzar un equilibrio determinado considerándose entonces el sistema como inestable.

En los sistemas dinámicos por tanto, podemos afirmar que los valores de equilibrio del sistema son función del tiempo ( $t$ ) y, por tanto, describirán una trayectoria pudiendo afirmarse que un modelado dinámico es una sucesión de equilibrios infinitesimales de un modelado estático. En la ilustración 2.37 se muestra, de forma genérica, cómo podemos definir un sistema en el que presentamos las variables de entrada, los procesos de relación entre éstas y las variables de salida del mismo.

Este esquema puede extrapolarse a un buque de guerra y en la figura 2.37, vemos representado el sistema buque y algunas de las variables que afectan a su eficiencia; así, tendremos una serie de variables de entrada y de salida que influirán en el equilibrio del sistema buque dependiendo, desde el punto de vista energético, de elementos como los modos de funcionamiento, las condiciones climáticas o las variables tales como los horarios de trabajo o el estado del mar.

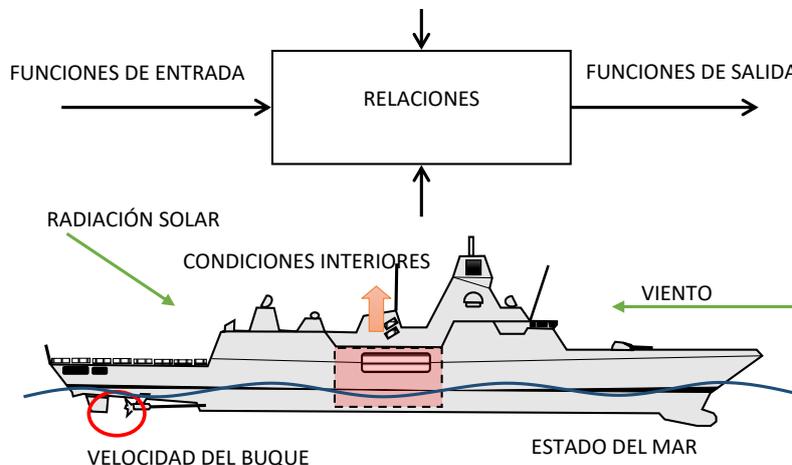


Figura 2.37: Sistema buque. Elaboración propia (2018)

## 2.10. Análisis de variables de los sistemas energéticos

Tradicionalmente, el análisis de las variables de los sistemas energéticos, se hacía sin tener presente la variabilidad con respecto al tiempo ( $t$ ) por su complejidad de análisis. Como norma general, se establecen criterios de tipo estático en los que se marcan horquillas de valores máximos y mínimos entre los que queremos que trabaje nuestro sistema. Ejemplo de estos estudios estáticos pueden ser los de análisis climático de regiones concretas de la tierra [188], ya que aquí el carácter estacional es conocido y, por tanto, los valores atípicos o “outliers” son escasos y, por ello, pueden funcionar bien los modelos estáticos; este no es el caso de un buque ya que por su movilidad, y dependiendo del punto del globo en que se encuentre y el modo en el que esté operando, el número de variables asociadas es muy grande y el análisis de los valores atípicos o “outliers” es importante [189].

Como ejemplo, consideraremos los sistemas de climatización de la nave por ser los que generalmente presentan una mayor demanda energética en un buque de guerra [190] así, dependiendo de los espacios que queramos climatizar, consideraremos una serie de factores y valores relacionados con las condiciones exteriores e interiores del buque, como podemos ver en la tabla 3.4, donde se presentan valores de humedad relativa (HR), temperatura del agua de mar (TM), temperatura exterior (TBS) y temperatura interior de los distintos espacios (TI), en % y °C.

Quedan establecidas así las condiciones ambientales de calidad atmosférica de los espacios cerrados del buque, mediante la variación de parámetros como la humedad, velocidad del aire y temperatura y así, dependiendo de la misión a la que va dedicado cada espacio interior, se mantendrán las condiciones ambientales dentro de unos rangos previamente establecidos de forma estática y que no van a representar la auténtica realidad del sistema por la característica dinámica de las variables y por la movilidad inherente a un buque.

Estas condiciones estáticas se establecen de igual forma para las estaciones denominadas fría y cálida, que se corresponden con las condiciones de invierno y verano para las que calculamos el buque.

Este tipo de análisis no tiene presente el dominio temporal en ningún momento, los modos de funcionamiento o la variabilidad de las condiciones ambientales exteriores o el cambio de posición del buque, por lo que no son, desde el punto de vista de la EE, procedimientos de diseño que favorezcan ésta o permitan un análisis realista de los sistemas energéticos embarcados.

Hoy en día, la mejora de los medios informáticos y la potencia de cálculo han facilitado que, en la actualidad, este análisis se pueda hacer de forma dinámica sin necesidad de recurrir al uso de los coeficientes de seguridad y evaluaciones entre máximos y mínimos tan empleados antaño en los análisis estáticos de las variables sin referencia al dominio temporal ( $t$ ). Por tanto, los sistemas embarcados deben ser tratados como sistemas dinámicos pues, el buque en sí, como sistema de sistemas, es un escenario puramente dinámico sobre el que influyen gran cantidad de variables externas e internas en todo momento.

Por tanto, el proceso de recolección de datos, su procesamiento, su filtrado y análisis dinámico permitirán establecer el conocimiento real del comportamiento de estas variables y su influencia en el consumo energético de los sistemas embarcados en el buque. Será necesario hacer este tipo de análisis sí queremos:

- Ver qué factores y variables influyen en cada proceso.

- Ver secuencias de eventos que dan lugar a comportamientos específicos de las variables.
- Poder discriminar y agrupar datos similares.
- Establecer análisis comparativos de datos históricos con el fin de realizar predicciones futuras en base a estos datos.
- Establecer análisis multidimensional basado, por ejemplo, en la situación o el modo de funcionamiento respecto del tiempo  $t$ .

## 2.11. Simulación de modelos de sistemas energéticos

Cualquier simulación que intentemos mediante un proceso de modelado requerirá de una batería de datos de las variables implicadas que sirvan de base al mismo. Estos datos serán de dos tipos fundamentales así, tendremos una serie de datos controlados y que conoceremos de forma cierta y un segundo grupo de datos no controlados de carácter probabilístico [191]. Con las simulaciones podremos establecer puentes de unión entre el análisis matemático puramente teórico y los estudios de carácter experimental, ofreciendo un marco de estudio de las aproximaciones realizadas en el modelo. Estas aproximaciones permiten evaluar sistemas de gran complejidad de una forma más sencilla y con cierta fiabilidad. En la ilustración 2.38 podemos ver un esquema general del proceso que debemos seguir para generar un modelo energético del buque de guerra desde el análisis de las variables ambientales, en el que primero debemos discriminar las variables implicadas que afectan al consumo y que nos darán la efectividad y eficiencia de la instalación; el control de estas variables nos permitirá conocer la calidad del análisis realizado.

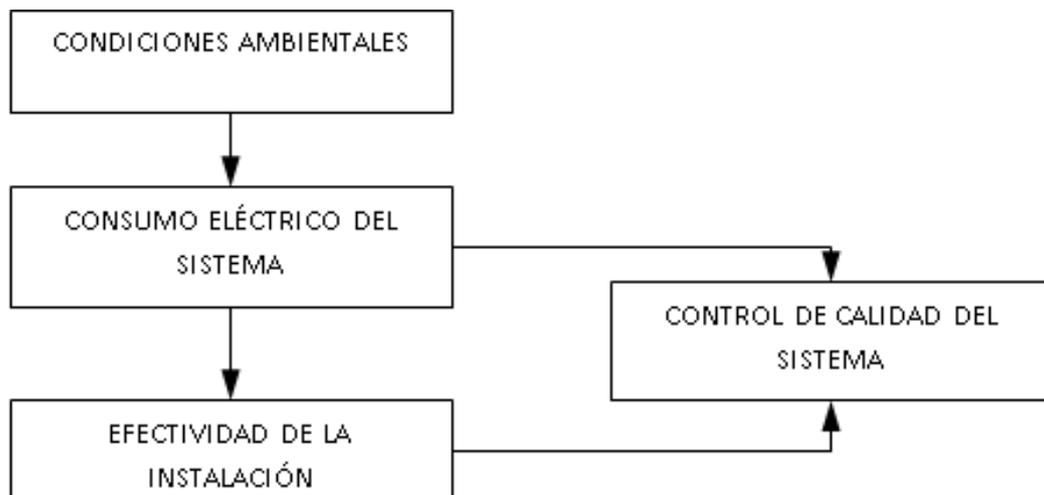


Figura 2.38: Proceso de análisis de datos. Elaboración propia (2016)

Para el desarrollo de modelos matemáticos se emplean métodos que se adaptan a nuestras necesidades; en el caso de sistemas energéticos, se emplean distintas herramientas de modelado tanto estático como dinámico si bien, en nuestro caso, será

necesario recurrir a herramientas de modelado de sistemas dinámicos por las características propias de los buques de guerra que lo hacen un sistema complejo al estar afectado por una gran cantidad de variables en el dominio del tiempo ( $t$ ).

Un método muy utilizado para la simulación son los MC. Es una técnica cuantitativa que permite estimar soluciones de problemas complejos en los que intervienen múltiples parámetros que producen un comportamiento aleatorio y de carácter probabilístico [192] basado en herramientas estadísticas. Para obtener resultados, el método emplea muestreo aleatorio que, en la actualidad, gracias al desarrollo informático, permite obtener bases de datos suficientemente amplias que son tratadas mediante el empleo de números pseudoaleatorios y herramientas de cálculo computacional para simular el comportamiento del sistema.

Para poder emplear de forma dinámica este método es necesario incluir en el mismo la variable del dominio del tiempo ( $t$ ); esta dinamización del método MC se puede hacer empleando el algoritmo de Metropolis [193] que introduce la variable temporal mediante un muestreo en el espacio de configuración creando una secuencia de estados muy correlacionados. Esta correlación es el fundamento dinámico del método MC.

Si queremos interpretar de manera dinámica los resultados, hay que asociar un tiempo ( $t$ ) a la escala de las configuraciones sucesivas que se obtienen con el algoritmo y, generando una trayectoria de la variable considerada [191].

## 2.12. Conclusiones del capítulo

En este capítulo hemos recopilado la información necesaria sobre los elementos fundamentales que nos permitan llevar a cabo la investigación en el trabajo de campo y el análisis posterior de los resultados obtenidos. Con la revisión bibliográfica hemos visto que, en materia de EE, los buques de guerra no son un campo del que exista amplia bibliografía si bien, constituye desde hace unos años un elemento de estudio prioritario en la mayoría de las marinas de nuestro entorno y también lo es en la Armada Española.

La mayor parte de la reglamentación existente se ha escrito para buques civiles y ha sido emitida por la IMO fundamentalmente la cual, está encontrando problemas para su implantación por la reticencia de los armadores a incorporar estos elementos (EEDI, SEEMP, EEOI) a sus buques o flotas. En el caso de la UE, se ha creado el SNV obligatorio para todos los buques que entren en sus puertos.

Hemos visto que esta normativa es adaptable a buques de guerra para así, conocer y determinar el nivel de EE del buque y sus niveles de emisión permitiéndonos tomar decisiones sobre elementos como la explotación de las unidades individuales o del conjunto de las flotas o agrupaciones navales de estas.

En cuanto a las medidas de carácter tecnológico que se están incorporando a los nuevos buques y como mejoras de los existentes, podemos tomar un sin fin de acciones como son acciones sobre la automatización, mejora de los ciclos de la energía a bordo, mejoras en el diseño de las formas o en el empleo de nuevos combustibles y energías alternativas renovables entre otras. Es evidente que estas actuaciones deben ser combinaciones de distintas medidas de carácter tecnológico, teniendo presente siempre que no todas pueden ser implementadas a un tiempo por lo que es importante analizar las combinaciones para dar con la más idónea de ellas que permita mejorar la EE.

En lo tocante a las herramientas matemáticas más empleadas en el campo de la EE, estas pasan por las técnicas estadísticas fundamentalmente y se orientan al análisis de los procesos de consumo energético ya que, por su carácter estocástico, pero predecibles en cierto modo con respecto a los modos de funcionamiento y condiciones ambientales, nos permiten efectuar un estudio dinámico.

Estas medidas facilitan la inferencia y así la predicción del comportamiento de los sistemas embarcados permitiéndonos conocer su funcionamiento real de tal forma que podamos implantar mejoras, en términos de EE, en los sistemas en su conjunto. Dentro de nuestros análisis podemos afirmar que la aplicación de las técnicas estadísticas son las mejores herramientas para aplicar a esta tesis, pues facilitan el planteamiento del problema y reduce los tiempos necesarios para, por ejemplo, conocer las correlaciones el comportamiento de las variables con la aplicación de gráficos de control estadístico de la calidad del proceso respecto de tiempo.

El análisis de los distintos elementos aplicados en el trabajo de campo nos permitirán conocer la idoneidad de los distintos elementos matemáticos presentados en este capítulo y, servirán como guía de actuación en futuros estudios en el campo de la EE en buques de guerra.

# Capítulo 3

## Trabajo de campo

Este capítulo describe como se ha realizado el trabajo de campo, la documentación técnica y capacitación personal, las herramientas empleadas para la toma de datos, los entornos geográficos en los que se ha desarrollado el estudio y los distintos periodos temporales. Debemos tener presente que un buque de guerra, a diferencia de los buques civiles o las edificaciones, se ven sometidos a multitud de variaciones tanto en su posición geográfica, como en las condiciones internas y externas ambientales, modo de funcionamiento y características cualitativas de la vida a bordo dependientes, en todo momento, de los elementos anteriores.

### 3.1. Documentación técnica empleada y capacitación

Para la elaboración de este trabajo ha sido necesario discriminar la literatura existente en materia de EE relacionada con el sector naval militar. La documentación ha sido recogida de diversas fuentes y así, fue necesario conocer el estado del arte sobre artículos técnicos en la materia y otras publicaciones como libros o actas de congresos y literatura gris relacionada como son tesis doctorales y trabajos de expertos. Además de conocer la base documental que nos permita desarrollar esta parte del trabajo fue necesario proceder a la capacitación en algunas materias mediante el desarrollo de cursos de especialización y adiestramiento en herramientas y aplicaciones informáticas empleadas en la toma de datos, su modelado y análisis.

### 3.2. Caracterización del sistema objeto de estudio

El sistema que vamos a analizar en esta tesis es un buque de guerra tipo escolta. Estos buques son los más abundantes entre las unidades navales de las marinas de guerra actuales por lo que su análisis es interesante desde una perspectiva energética.

Para poder realizar las misiones para las que están diseñados, es necesario embarcar una serie de sistemas que se clasifican en base al ESWBS explicado en el punto 2.4.4 en una serie de familias que los relacionan con las distintas funcionalidades del buque sistema.

En nuestro caso hemos seleccionado una fragata de la clase F-100 de la Armada española. Este tipo de fragatas embarcan sistemas de generación eléctrica encargados de alimentar el resto de sistemas del buque. Como todo buque de guerra, las fraga-

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO

tas F-100 se han optimizado para albergar el SC y sus dimensiones principales las podemos ver en el cuadro 3.2. Nuestro análisis lo centraremos en la fragata “Cristóbal Colón” última de la clase construida en 2012 y que fue entregada a la Armada en 2013.

Características	Dimensión
Eslora total (L)	146,698 m.
Eslora en la flotación (Lf)	133,20 m.
Manga Máxima (B)	18,60 m.
Manga en la flotación	17,50 m.
Calado de diseño	4,75 m.
Puntal de trazado a la cubierta principal en L/2	9,80 m.
Puntal de trazado a la cubierta de averías en Lf/2	6,90 m.
Calado a plena carga	5,00 m.
Desplazamiento máx. de contrato	6.041 Tn.
Desplazamiento máx. de contrato y margen futuro	6.391 Tn.

Cuadro 3.1: Dimensiones principales del buque. Elaboración propia (2016)

El desarrollo de la plataforma de todas las F-100 se basa en las formas de las fragatas desarrolladas durante los años 80 con la serie sistemática BAZAN 82 y representan una conjunción de requisitos de resistencia y comportamiento en la mar que buscan obtener una plataforma polivalente para realizar las misiones típicas de buques de escolta y combate, marcando como prioridad optimizarlas para obtener formas más eficientes en el más amplio sentido de la palabra. El número de personas que puede embarcar en este tipo de buques está entorno a las 200. El SC “Aegis” embarcado en las fragatas de la clase F-100 de la Armada Española, integra todos los sistemas relacionados con las funciones de detectar, localizar, evaluar, atacar y destruir los objetivos.

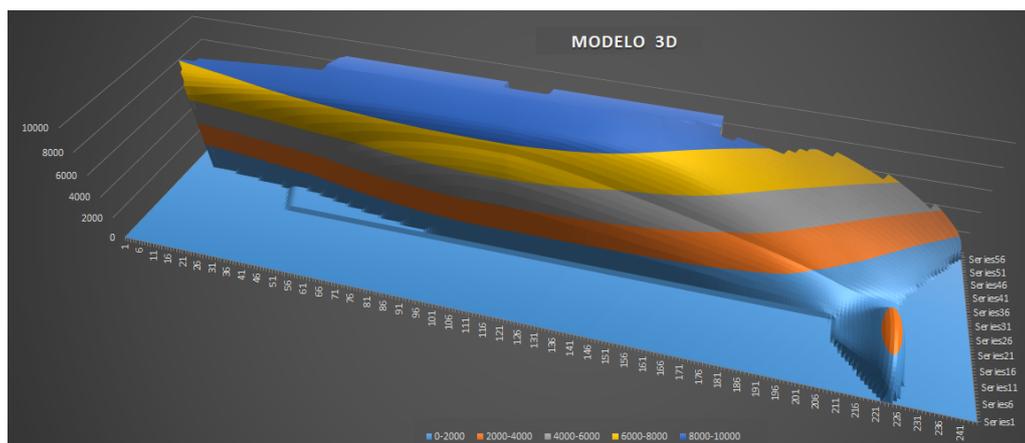


Figura 3.1: Modelo 3D. Elaboración propia (2017)

En la figura 3.1 podemos ver un modelo en tres dimensiones elaborado con datos incompletos tomados sobre planos generales del buque, esto se ha ejecutado con

hoja de cálculo comercial “Microsoft 360 Excel” de forma sencilla elaborando un mapa de puntos. Como se puede ver no es muy exacta pero para nuestros fines de análisis de modelos térmicos es suficiente. Se presenta la mitad del casco de Babor<sup>1</sup>. La F-105 dispone un sistema de propulsión de planta combinada CODOG, compuesto por dos turbinas General Electric GE 2500-LM naval de 17.500 kW c.u. y dos motores diésel BAZAN de 6.000 kW cada uno distribuidos en dos cámaras de máquinas para la propulsión. Dispone también, de dos cámaras de generación diésel con dos motores cada una de ellas. Los motores son MTU de 1.200 kW cada uno y se encargan de suministrar energía eléctrica en todo momento al resto de sistemas como ya hemos comentado anteriormente.

Cuando el barco se encuentra en puerto, y no se arrancan los diésel generadores, se dispone de una toma de tierra. La potencia eléctrica dedicada a los sistemas embarcados en la fragata se reparte desde los cuadros eléctricos principales denominados: 1A, 1B, 2A y 2B.

Los circuitos de distribución son los típicos que podemos encontrar en cualquier buque de guerra de estas características y están compuestos por redes de Corriente Alterna / Alternate Current (AC) de 440, 115, 230 V a 400Hz y 60Hz y una red de Corriente Continua / Direct Current (DC) a 12 y 24 V.

### 3.2.1. El balance eléctrico de la F-105 y su reparto

Los cálculos de las SCE se basan en el empleo de datos reales de los fabricantes y la normativa específica, clasificando los distintos consumidores en base al ESWBS. La clasificación ESWBS agrupa los equipos y sistemas en siete familias numeradas con las centenas 100 a 700, siendo la primera de ellas destinada al acero y estructural del buque o plataforma y el resto, a los equipos y sistemas instalados en la misma. Analizados los consumidores instalados en la fragata F-105 partiendo de documento de cálculo de balance, constatamos que existen un total de 1.600 consumidores que suman 9.015 kW instalados. Estos 9.015 kW se desglosan por grupos o familias ESWBS como sigue:

- 200 Propulsión 483 kW
- 300 planta eléctrica 174 kW
- 400 Mando y exploración 1.623 kW
- 500 Sistemas auxiliares 5.322 kW
- 600 Habitabilidad 983 kW
- 700 Armamento 430 kW

Gráficamente suponen en porcentaje instalado los valores reflejados en la figura 3.2 letra a) así, a la vista de esta, vemos que la entidad de los consumidores correspondientes al grupo 500 de sistemas auxiliares es el más importante de todos y representa el 59% del total y en la distribución de Pareto se evidencia la entidad de este grupo como se puede ver en la misma figura 3.2 letra b). La nomenclatura de las

---

<sup>1</sup>Nos referimos al costado de Babor como la parte que queda a la izquierda si miramos hacia la proa; la parte derecha es la que se denomina Estribor.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO

distintas familias está en inglés correspondiendo su traducción con las asociadas a cada familia y que hemos relacionado sobre este párrafo.

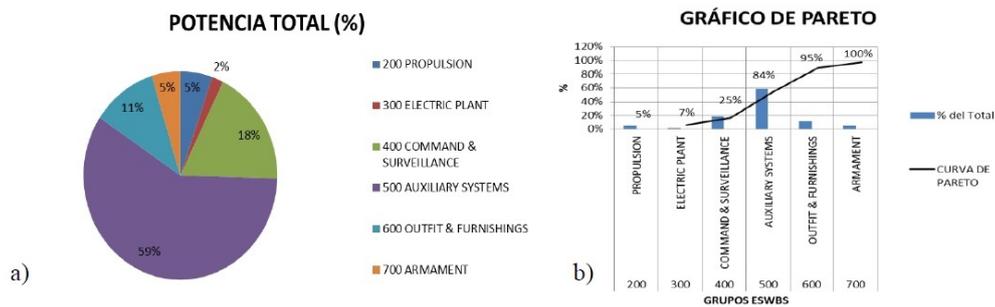


Figura 3.2: Distribución de consumidores. Elaboración propia (2016)

Aplicando el correspondiente factor de carga, el modo de funcionamiento y las condiciones climáticas, obtendremos diez SCE. Tendremos dos condiciones, una de verano y una de invierno, para la condición de fondeado y, otras dos para la de crucero, operación, puerto y emergencia. La figura 3.3 muestra el consumo en cada una de estas SCE en porcentajes. En la primera barra podemos ver el reparto por familias de la potencia total instalada (P.T.I), y en el resto cada pareja de SCE para cada modo de operación donde A es fondeado, P puerto, C crucero, O operación y E emergencia la letra V significa verano y la letra I invierno.

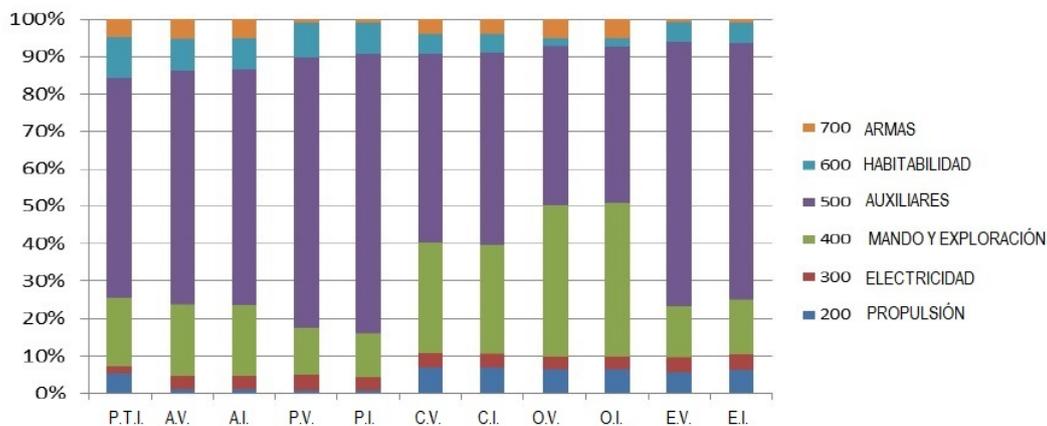


Figura 3.3: Las diez SCE de la fragata. Elaboración propia (2016)

Numéricamente los valores calculados en el balance eléctrico para el buque objeto de estudio son los que podemos ver reflejados en el cuadro 3.2 donde podemos ver el modo y la estación, la potencia máxima calculada y el número de Diésel Generadores (DD.GG.) empleados para alcanzarla. La potencia implicada en cada una de las familias de consumidores por condición aparecen reflejados en la figura 3.3 donde podemos ver que son, los sistemas auxiliares, los que tienen el mayor peso de todos los grupos.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO

Modo y estación	Consumo en kW	n° de DD.GG.
Fondeado verano	1.598	2
Fondeado invierno	1.682	2
Puerto verano	907	1
Puerto invierno	993	1
Crucero verano	2.535	3
Crucero invierno	2.591	3
Operación verano	2.730	3
Operación invierno	2.699	3
Emergencia verano	2.558	3
Emergencia invierno	2.370	3

Cuadro 3.2: Valores de potencias máximas consumidas. Elaboración propia (2018)

En el caso de los buques de guerra podemos asumir de forma general que, el Life Cycle Cost / Coste de ciclo de vida (LCC) se reparte entre periodos en el mar y periodos en puerto. El primero de los periodos incluirá las condiciones de operación, crucero, fondeado y emergencia y, el segundo de ellos, incluirá los periodos en puerto apagado y en puerto encendido.

Del tiempo total de vida útil del buque, podemos considerar que el 30% de este se pasa en el mar repartido en un 25-27% en navegación y un 3-5% en operaciones; por otro lado el tiempo en puerto y, fondeado supone el 60% del tiempo del que permanece encendido entre el 10-15% y apagado con corriente de tierra el 45-50% restante. Los periodos de mantenimiento abarcan el 10%, los de mar del 27 al 30% hasta sumar así el 100%. La distribución la podemos ver de forma más gráfica en el cuadro 3.3.

Periodo	Condición	% de tiempo de LCC
En el mar	Fondeado/crucero	27-30
En el mar	Operación	3-5
En puerto	Apagado	45-50
En puerto	Encendido	10-15
En puerto	Mantenimiento	10

Cuadro 3.3: Distribución del ciclo de vida (LCC). Datos Armada Española (2016)

Por tanto el estudio es complejo, a diferencia de una instalación terrestre donde se pueden predecir de forma aproximada elementos como los climatológicos, en el caso de los buques de guerra se pueden presentar escenarios muy distintos en cada uno de los modos de operación debido a la movilidad inherente de este y la variación que conlleva. De todas formas como podemos ver en la tabla n° 2, el buque pasa prácticamente la mitad de su vida en puerto, ya sea en su base propia o en otros puertos en los que deba recalar por lo que, para este estudio hemos decidido analizar una serie temporal de los modos más habituales.

La gran cantidad de equipos instalados en la F-105 hace necesario un sistema de climatización HVAC que permita por una parte disipar el calor generado por el funcionamiento de los distintos sistemas y conseguir las condiciones de confort óptimas para las personas que se encuentran trabajando a bordo.

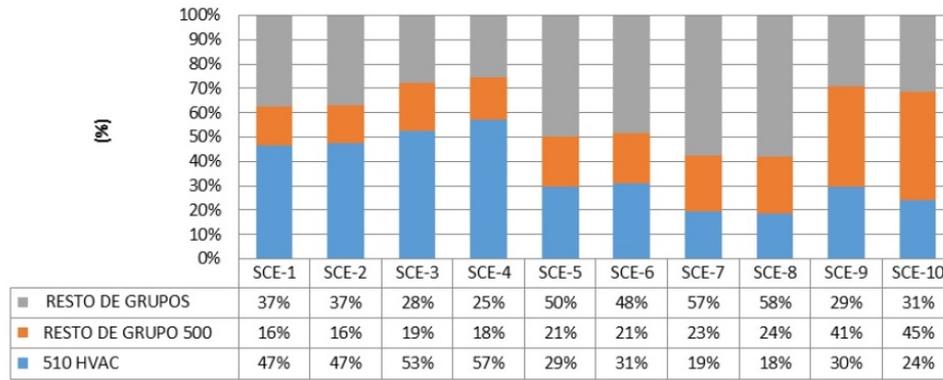


Figura 3.4: Peso del HVAC en cada SCE. Elaboración propia (2016)

Cuando analizamos las distintas SCE para las condiciones o modos de operación del buque tanto en invierno como en verano, observamos que es también el grupo 500 de sistemas auxiliares el que predomina en la mayoría de ellas. Especial atención tiene en este caso las situaciones de puerto en invierno donde el consumo de estos sistemas del grupo 500 supone el 75% del total como podemos ver en la representación de los distintos grupos en el figura 3.4 según los cálculos de diseño. Podemos ver cada condición de carga eléctrica, cinco para verano y cinco para invierno numeradas desde la SCE-1 a la SCE-10. En todas ellas el HVAC tiene una presencia importante representado en alguna de ellas el 57% del consumo total como valor máximo y un 18% como valor más bajo de consumo de este sistema y que representan entre 600 y 180 kW de consumo. Dada la entidad de este sistema conviene dar una breve descripción del mismo para conocer sus componentes.

### Descripción del sistema HVAC y su funcionamiento

El sistema HVAC instalado a bordo de la F-105 se encarga de mantener y controlar las condiciones ambientales de calidad atmosférica de los espacios cerrados del buque mediante la variación de parámetros como la humedad, la velocidad del aire y la temperatura.

Dependiendo de la misión a la que se dedica cada espacio interior, será necesario mantener las condiciones ambientales de estos dentro de unos parámetros previamente establecidos y que podemos ver en el cuadro 3.4 de esta tesis.

Estas condiciones ambientales se establecen de igual forma para las estaciones denominadas fría y cálida que se correlacionan con las condiciones de invierno y verano establecidas en el cálculo de las SCE dentro de unos rangos de máximos y mínimos. Los sistemas HVAC se someten a criterios de proyecto estrictos que garanticen su buen funcionamiento [194] sobre la base de normativa aceptada generalmente por los países adheridos a la Organización del Tratado Atlántico Norte (OTAN) como es el caso de nuestro país.

Los sistemas de climatización de los buques de guerra deben ser polivalentes para poder actuar como sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, manteniendo atmósferas controladas en distintas zonas del buque con la finalidad de ofrecer el necesario confort térmico a las personas, ser capaces de filtrar y reciclar el aire

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO

Condición	Estación	Espacio	HR	TBS	TM	TI
Exterior	Verano	Ambiente	70 %	32C	29C	-
Exterior	Invierno	Ambiente	-	-12C	-2C	-
Interior	Verano	Espacios de habitabilidad	$\leq 55\%$	-	-	27C
		Espacios equipos electrónicos	$\leq 55\%$	-	-	27C
		Espacios de equipos eléctricos	$\leq 55\%$	-	-	40C
		Centro de control del buque	$\leq 55\%$	-	-	27C
		VLS (lanzador de misiles)	$\leq 55\%$	-	-	27C
Interior	Invierno	Espacios de habitabilidad	$\leq 55\%$	-	-	21C
		Espacios equipos electrónicos	$\leq 55\%$	-	-	21C
		Espacios de equipos eléctricos	$\leq 55\%$	-	-	25C
		Centro de control del buque	$\leq 55\%$	-	-	21C
		VLS (lanzador de misiles)	$\leq 55\%$	-	-	21C

Cuadro 3.4: Condiciones ambientales de diseño para el buque seleccionado.

respirable y permitir el funcionamiento de los equipos electrónicos sin que estos se averíen o tengan un funcionamiento incorrecto como es el caso de los equipos electrónicos del SC.

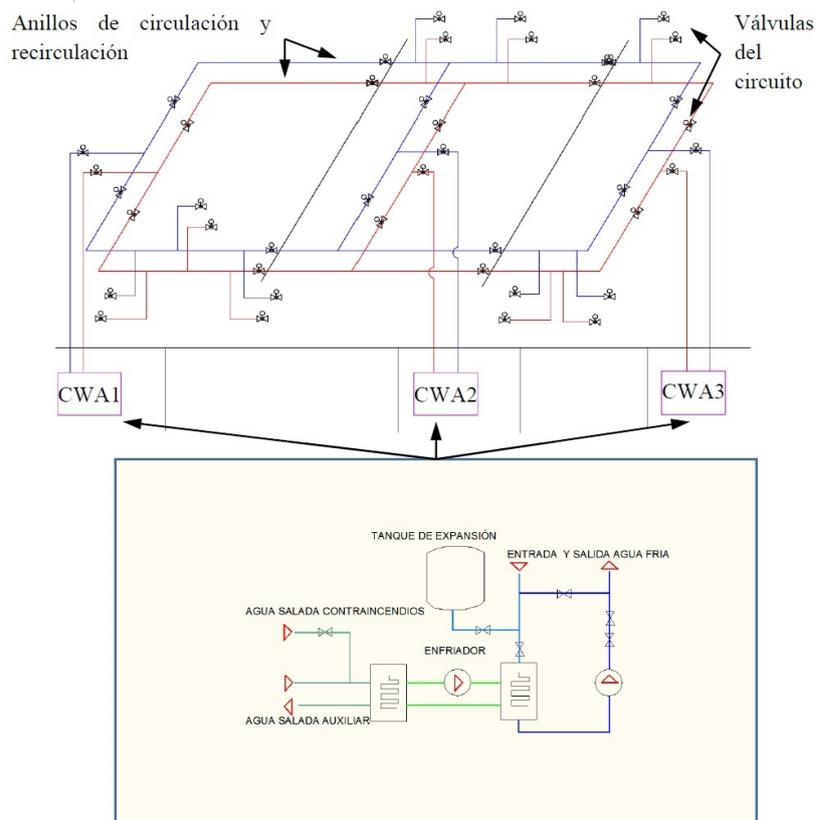


Figura 3.5: Esquema del circuito HVAC. Manual del sistema (2012)

También juegan un papel importante en la ventilación de las cámaras de máquinas principales y auxiliares manteniendo la temperatura dentro de unos rangos óptimos para el funcionamiento de motores y turbinas o, los equipos auxiliares que se

instalan en estos locales como pueden ser bombas de lastre, plantas de tratamiento de aguas residuales o plantas de ósmosis por poner algunos ejemplos. La ventilación en espacios de máquinas suministra el aire necesario para la eliminación del calor y gases producidos.

En el resto de espacios que no están directamente conectados al sistema HVAC, el sistema renueva el aire en el interior del buque y consigue así, una calidad de aire preestablecida. En la figura 3.5 vemos los dos anillos cerrados de circulación del agua refrigerada y un esquema de las unidades productoras, este agua es la que se emplea en los distintos componentes del sistema para enfriar o calentar el ambiente. Este sistema es en realidad un sistema de sistemas y, en el podemos distinguir:

1. El sistema ventilación y de aire para la combustión.
2. El sistema de calefacción.
3. el sistema de aire acondicionado.

En el sistema de ventilación debemos referirnos al aire empleado para combustión de las máquinas térmicas (motores y turbinas) y el resto del aire dedicado a la ventilación del resto de espacios. Este es tomado directamente del exterior a través de conductos destinados a estos dos fines de forma separada. En ambos casos la ventilación puede ser natural o forzada y emplea en su funcionamiento:

1. Ventiladores. Encargados de dar movimiento al fluido.
2. Controladores de los ventiladores. Regulan el movimiento de la masa de aire.
3. Conductos. Son los encargados de dirigir este movimiento de aire.
4. Válvulas de cierre. Restringen el paso del aire a ciertos conductos y áreas.
5. Persianas neumáticas de cierre rápido. Bloquean el acceso desde el exterior del aire.
6. Tapas de acceso, bridas y filtros. Son accesorios empleados para el mantenimiento, instalación y resto de componentes asociados.
7. Enfriadores (condición cerrada en caso de emergencia de tipo Nuclear, Radiológica, Biológica y Química (NRBQ)) asociados a la ventilación de espacios de máquinas.

El sistema de calefacción se encarga de calentar el aire que circula por los conductos del sistema de ventilación y del sistema de aire acondicionado evitando la condensación en los conductos. De esta forma, y sumado el efecto de los calentadores de torre y las unidades de calefacción, se eleva la temperatura de los espacios interiores manteniendo esta en los niveles de confort adecuados. Consta de los siguientes componentes:

1. Calentadores eléctricos de conducto. Elementos de resistencia encargados de elevar la temperatura.
2. Recalentadores. Empleados en cierta zona para mejorar las condiciones de temperatura de confort de forma local.

3. Calentadores eléctricos de torre. Con la misma finalidad que los anteriores.
4. Termostato digital de dos posiciones (2PD). Controlan las condiciones de temperatura de los locales en los que e encuentran instalados.
5. Unidades de calefacción. Encargadas de la calefacción del aire en los locales de habitabilidad.

El sistema de aire acondicionado está proyectado para mantener una cantidad de aire en los compartimentos del buque con unas condiciones de temperatura, humedad y pureza determinadas de forma automática. Estas se logran mediante la recirculación del aire que toma de un espacio, tratándolo y devolviéndolo al mismo espacio acondicionado. Los componentes principales de este sistema [195] son:

1. Unidades de enfriador-ventilador denominados Fan-Coil (FC)
2. Serpentes de Conducto (CC) con sus correspondientes ventiladores.
3. Unidades de Refrigeración (UC).
4. Serpentes de Gravedad (GC).
5. Conductos, filtros, y terminales de aire acondicionado.

Las unidades FC (un total de 49), los CC y los conductos se encargan de repartir el aire desde los FC a todos los locales del buque.

Las UC y GC están instalados de forma individual en el buque. Las instalaciones de recirculación se distinguen por la unidad FC o ventilador instalado. Tanto la unidad enfriador-ventilador o ventilador solo, como los conductos asociados a los mismos, llevan la misma denominación.

La instalación dispone de tres Unidades de Enfriamiento de Agua (CWA) alimentadas con agua de mar que se enfría para pasar posteriormente a los FC que enfrían el aire, este aire es el que se distribuye a los distintos espacios del buque. Las tres unidades pueden funcionar de forma segregada refrigerando zonas separadas del buque o pueden funcionar en conjunto repartiendo la carga entre las tres pueden funcionar de forma automática, manual para mantenimientos y en emergencia como podemos ver en la figura 3.5.

Com ya hemos comentado, el sistema HVAC necesita agua de mar para su funcionamiento. De forma general en un buque se suele emplear agua de mar como elemento de refrigeración por su facilidad de tratar y disponibilidad. Generalmente se disponen tomas de mar que recogen el agua de mar y la hacen circular a elementos como son los condensadores, enfriadores de agua para HVAC o serpentines de refrigeración además, el agua de mar se emplea también en el circuito de Contra Incendios (C.I.). En nuestro caso el agua salada se emplea en los siguientes circuitos independientes:

- Refrigeración de Motores principales de propulsión (MM.PP.) y equipos de cámara de máquinas.
- Refrigeración de los DD.GG. elementos auxiliares y enfriadores de agua para HVAC.
- Enfriadores de agua para elementos del sistema de combate.

- Circuito de agua de C.I.

Nos vamos a centrar en los dos primeros de esta lista. El resto de equipos que se encuentren fuera de los locales de máquinas emplearán agua procedente del circuito de C.I. y así, de forma general en cada cámara de máquinas se dispone un colector principal de agua de mar con dos admisiones una en cada costado, con bombas con caudal suficiente para alimentar las necesidades de agua de refrigeración de todos los sistemas instalados en estas. La alimentación se lleva por líneas separadas posteriormente a cada uno de los elementos que necesitan de esta.

Lo mismo sucede con las cámaras de DD.GG. en las que se disponen tomas de mar para admisión del agua necesaria para la refrigeración de estos y de todos los elementos que lo necesiten dentro de estos espacios.

En el caso de los MM.PP. y DD.GG. el agua de mar refrigera a su vez un circuito de agua dulce que es la que se encarga de refrigerar elementos de los motores ya que el agua salada es altamente corrosiva y perjudicial para estos.

En el caso de los enfriadores de agua para el sistema HVAC toman directamente de tomas de mar dedicadas como en el caso de los anteriores. Los modos de funcionamiento de estos circuitos en este caso son tres:

1. Fuera de operación: el motor o sistema no están arrancados, están parados y no hay circulación.
2. En operación: en este caso los motores principales son refrigerados por los colectores dedicados específicos de su sistema de refrigeración al igual que los DD.GG. y las plantas de agua fría.
3. Emergencia: en este caso la refrigeración de los MM.PP., DD.GG. y enfriadores de agua son alimentadas por el circuito de C.I.

En nuestro caso vamos a analizar únicamente los primeros dos modos en el trabajo de campo (fuera de operación y en operación). las Características técnicas de los circuito son:

- El circuito de agua de refrigeración de los MM.PP.: de forma simplificada toma agua de mar que se envía a un enfriador de agua dulce de refrigeración del motor en el cual se produce un intercambio de calor de 3.860 kW con las características. Se baja la temperatura en dos etapas, falta un segundo enfriador de placas que baja la temperatura de 48,5 °C a 47,1 °C retirando 35 kW suplementarios en el caso de los motores principales (figura 3.6).

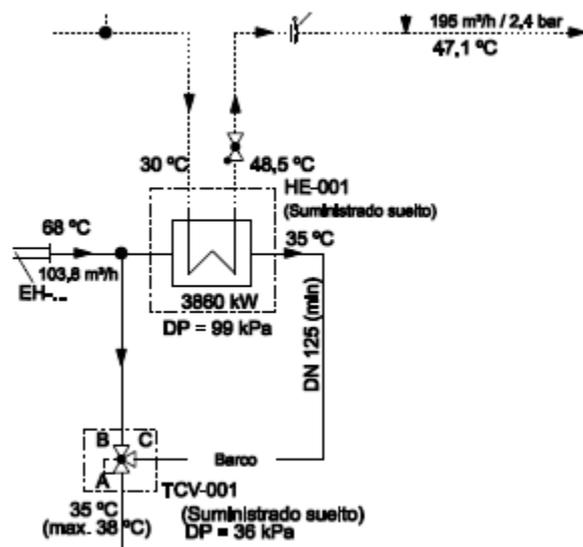


Figura 3.6: Esquema de las unidades y circuito. Manual del sistema (2012)

- El circuito de los DD.GG.: se instala un enfriador de similares características al anterior con un intercambio de calor de 3.860 kW. En realidad la transmisión de calor es algo menor pero analizado el funcionamiento y, para agilidad del estudio, podemos considerar el mismo valor para los cuatro diésel generadores.

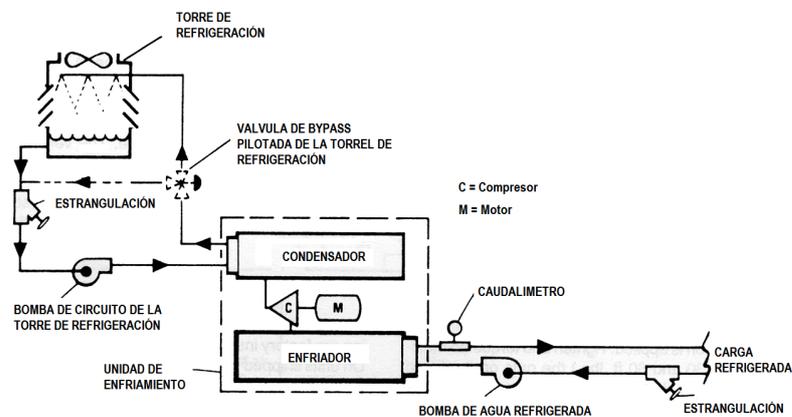


Figura 3.7: Esquema refrigeración de los diésel. Manual del sistema (2013)

- El circuito de los enfriadores: estos circuitos son iguales para las tres unidades enfriadoras embarcadas distribuidas en tres locales de máquinas que alimentan un circuito de doble anillo con 39 FC. Las características de funcionamiento de estos son las siguientes:
  - Caudal de agua refrigerante: 160 m³/h entrada y salida.
  - Caudal de agua de mar: 145 m³/h entrada y descarga.

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO

- Refrigerante R134a
- Saturación en la admisión 39,2 °F
- Descarga saturación 101,3 °F<sup>2</sup>
- Caudal de agua refrigerada 160 m<sup>3</sup>/h
- Temperaturas de trabajo entre -2°C y +29 °C

En la figura 3.7 podemos ver el esquema de refrigeración de cámaras y en la figura 3.8 podemos ver las características del refrigerante R134-a. Como información adicional sobre la ventilación de los locales de máquinas reflejaremos que:

- Todos los locales de máquinas se ventilan con aire enfriado por los FC instalados en el buque
- El aire se toma por ventiladores de impulsión y se circula en el espacio gracias a las extracciones que lo echan al exterior del buque.
- Los caudales son los siguientes:
  - Cámaras de MM.PP.: impulsión 34.000 m<sup>3</sup>/h extracción 39.000 m<sup>3</sup>/h.
  - Cámaras de DD.GG.: impulsión 22.000m<sup>3</sup>/h extracción 26.000 m<sup>3</sup>/h.
  - Cámaras de auxiliares 1 a 4: impulsión 1.600 m<sup>3</sup>/h extracción 2.000 m<sup>3</sup>/h.

Version : 5		Date : 21/05/2002
		Supersedes : 14/12/2001
Hygiene measures :	Do not drink, eat or smoke in the workplace	
<b>09 PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES</b>		
Physical state :	Liquefied gas	
Colour :	colourless	
Odour :	slightly ethereal.	
pH :	Not applicable	
Specific temperatures :		
- Melting :	-101 °C	
- Boiling :	-26.4°C.	
Critical temperature :	+101 °C	
Critical pressure :	4070 kPa.	
Decomposition temperature :	> +370 °C	
Flammability characteristics :		
- Flash point :	None	
- Auto-ignition temperature :	+743 °C	
Vapour pressure :	665 kPa at 25 °C	
Vapour density (air = 1) :	3.6	
Specific gravity :	1.21 g/cm <sup>3</sup> at 25 °C	
Solubility :		
- in water :	0.9 g/l.	
Octanol/water partition coefficient :	1.06 (log POW).	

Figura 3.8: Especificación técnica del refrigerante R134-a. Ficha técnica (2012)

Los espacios de máquinas dedicados a la propulsión y generación así como los de equipos auxiliares los podemos ver de forma gráfica en la figura 3.9 en la que vemos

<sup>2</sup>Para transformar temperatura en Fahrenheit (°F) a Celsius (°C) emplear la siguiente relación  $((T_F \cdot \frac{5}{9}) + 32) = T_C$

la posición relativa entre estos locales dentro del buque y una foto con su aspecto exterior fondeado en la bahía de Jervys en Australia.

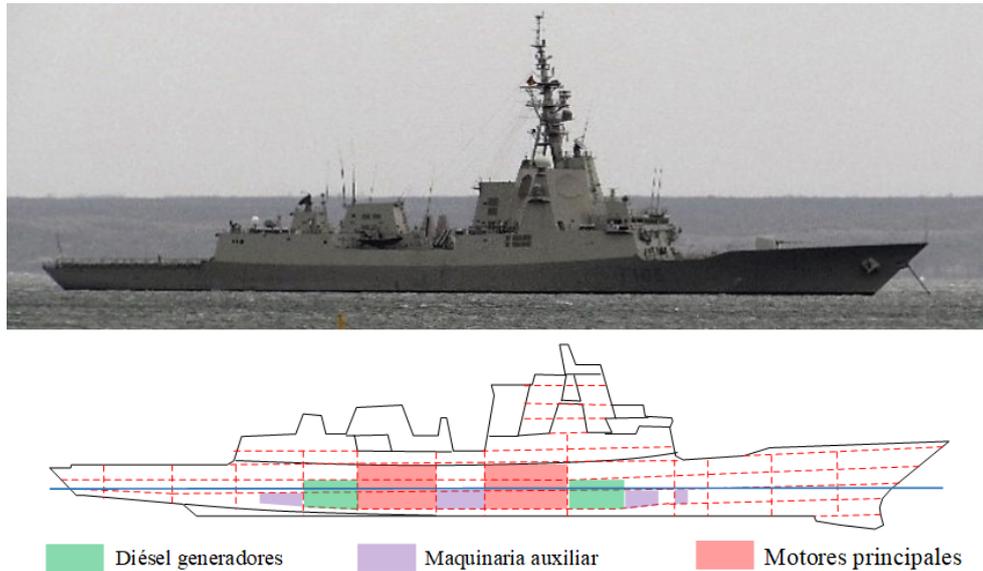


Figura 3.9: Espacios de máquinas. Elaboración propia (2016)

#### Descripción de las tomas de mar y descargas

Estos dos elementos son fundamentales para la refrigeración de equipos que la necesitan por su tamaño o para el sistema HVAC de buque. Debido a que el agua salada es corrosiva, cuando se emplea para refrigerar equipos electrónicos se usa como circuito secundario refrigerando agua dulce, agua mecánica o, en el caso de motores, refrigerar aceites o agua destilada.

En el caso de nuestro buque existen dos tomas de mar principales simétricas por ambos costados y situadas en las cámaras de máquinas principales. En la figura 3.10 podemos ver flechas en rojo que marcan la posición de las tomas de mar principales. Estas son simétricas respecto de los dos costados. Se han numerado del 1 al 4 y se encuentran en las cuadernas números<sup>3</sup> 78, 100, 134 y 147 respectivamente.

Las flechas azules muestran la posición de las descargas. No todas son simétricas respecto de los dos costados. En el costado de Babor están las B, E, F, H y en el costado de Estribor las A, B, C, D, G y H. Las marcas A, B, G y H corresponden a las cámaras de diésel generadores y las C, D, E y F a las de las cámaras de máquinas principales.

Esta imagen es esquemática y es para poder ubicar los elementos principales de toma y descarga. Hay que tener presente que este buque tiene muchas otras tomas y descargas secundaria para equipos más pequeños que no representamos para mayor claridad.

<sup>3</sup>El espaciado entre cuadernas es de aproximadamente 600 mm. En el caso de la cuaderna 78 esta se encuentra a 46.800 mm de la Perpendicular de Popa que es la cuaderna 0 desde la que medimos las distancias en el sentido de la eslora L del buque. Las cuadernas son un elemento fundamental en el dimensionamiento del buque y para la generación de las formas del mismo.

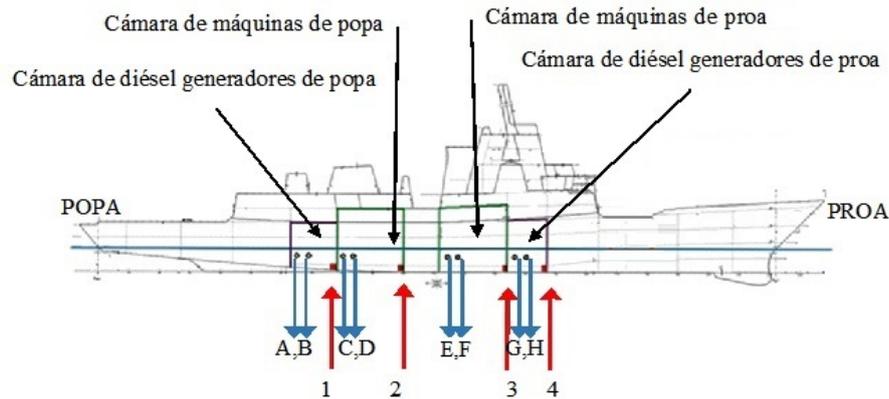


Figura 3.10: Tomas y descargas, esquema. Elaboración propia (2019)

### 3.3. Caracterización del entorno geográfico y temporal

Una cuestión que debemos tener presente y que es distintiva de nuestro estudio, es que el sistema estudiado está en movimiento en un espacio muy amplio del Globo. Estamos acostumbrados a ver múltiples estudios de EE que se analizan parámetros ambientales de edificaciones que se encuentran fijas en un espacio claramente delimitado en un área geográfica y con parámetros ambientales concretos.

En nuestro caso se hace necesario tomar series de datos de variables sobre un sistema que está moviéndose sobre la superficie del mar entre puntos del globo muy distantes unos de otros y por tanto, estamos obligados a considerar también la variación horaria que el movimiento de la tierra impone dado que, los datos en nuestro caso, se han tomado en puntos con coordenadas geográficas distintas que, en ocasiones, como se puede ver en la figura 3.11 que sirve de ejemplo y que se corresponde con uno de los viajes analizados, en el que se atravesó el Atlántico. Podemos ver que, los puntos inicial y final, se encuentran separados por cinco husos horarios además, para no desvirtuar la toma de datos deben de ser ajustados en los periodos en puerto a la hora local esté donde esté. En el caso de la figura 3.11 tenemos representada la primera de las navegaciones de estas características que hemos analizado en nuestro estudio y será sobre la que nos basaremos, a modo de ejemplo ilustrativo para introducir ciertos elementos que debemos tener presentes en los movimientos que se hacen sobre la esfera terrestre en el mar.

#### 3.3.1. Coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas de un punto sobre la superficie del globo terrestre vienen dadas por un par ordenado de medidas angulares que, con respecto a unas líneas imaginarias denominadas meridianos y paralelos, identifican de forma inequívoca su posición. Estas dos medidas son denominadas longitud y latitud y se expresan en grados, minutos y segundos con respecto a los puntos cardinales Este-Oeste para la longitud y, los puntos Norte-Sur para la latitud. También pueden expresarse de forma decimal empleando los signos más (+) para los puntos en el Este y el Norte, y menos (-) para los puntos en el Sur y el Oeste. En el par ordenado se escribe la latitud primero seguida de la longitud. La latitud es la medida

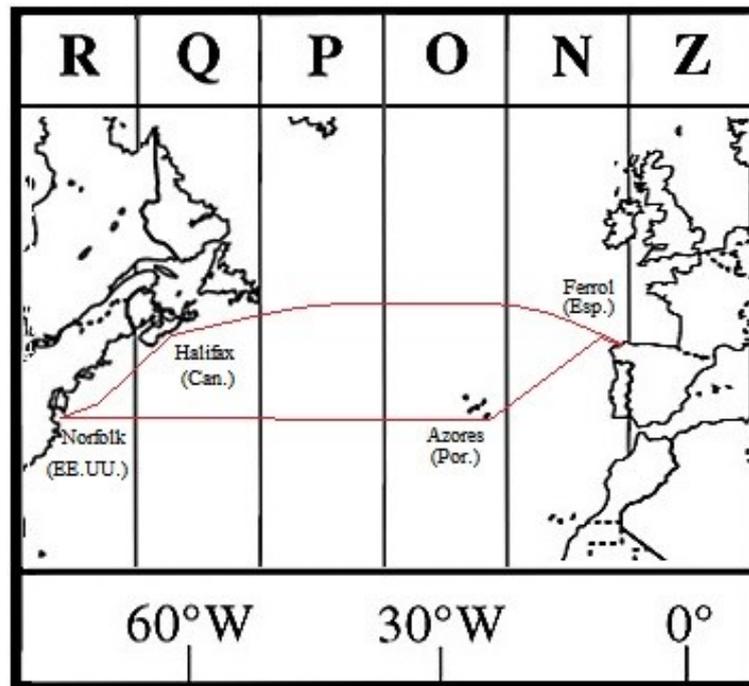


Figura 3.11: Viaje a Norfolk. Elaboración con *HM N. Almanac Office (UK)*(2016)

angular con respecto al Ecuador o círculo máximo ecuatorial siendo el valor máximo de  $90^\circ$  respecto del polo Norte y  $90^\circ$  respecto del polo Sur. El valor mínimo es  $0^\circ$  y se corresponde con los puntos situados sobre el Ecuador terrestre. El resto de paralelos son los círculos resultantes de cortar con planos paralelos al del ecuador ambos hemisferios. La longitud es la medida angular con respecto al meridiano de referencia denominado meridiano de Greenwich o meridiano cero. Los meridianos son semicírculos entre los polos con valor máximo de  $180^\circ$  Este y  $180^\circ$  Oeste. Para la longitud se consideran valores positivos al Este y valores negativos al Oeste. La figura 3.12 muestra de forma esquemática lo explicado hasta ahora así, podemos ver representadas las latitudes  $45^\circ$  Norte y  $45^\circ$  Sur a las que hemos hecho corresponder las longitudes  $45^\circ$  Este. Vemos así que, si bien la longitud coincide, es la latitud la que caracteriza su situación sobre el Globo. De otra forma, a una misma latitud, podemos asignar todas las longitudes que se puedan considerar en los  $360^\circ$  de circunferencia para un paralelo o latitud considerada.

### 3.3.2. Husos horarios

Un huso horario es cada una de las veinticuatro divisiones que se hace de la superficie terrestre usando como base los meridianos y equivaliendo cada uno de ellos a un ángulo de  $15^\circ$ . El meridiano de referencia es el de Greenwich o cero sobre el que se centra el primero de los husos marcando el cero de referencia. A partir de aquí se distribuyen el resto de husos siendo la suma positiva hacia el Este y negativa hacia el Oeste es decir, el primer huso al Este suma una hora a la hora del meridiano de referencia y el primer huso al Oeste restaría una hora a la hora del meridiano de referencia y así sucesivamente.

En el cuadro 3.5 podemos ver esta distribución y la variación horaria correspondien-

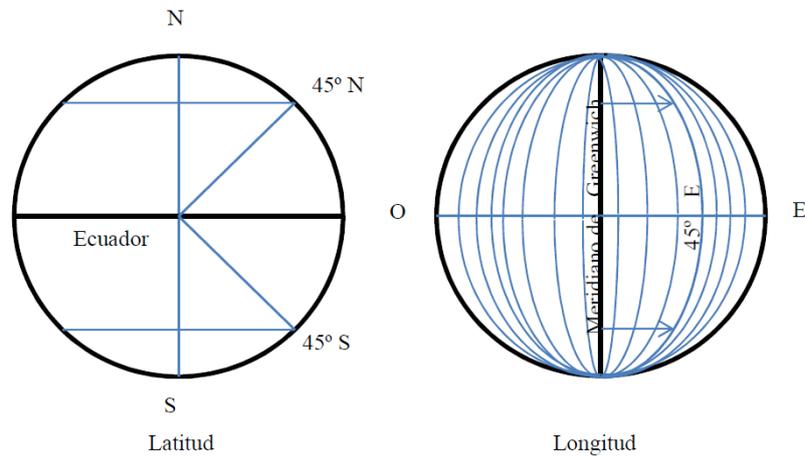


Figura 3.12: Coordenadas geográficas. Elaboración propia (2016)

UTC	Hora Militar (Z)	UTC	Hora Militar (Z)
UTC±0	Zulu	-	-
UTC+1	Alfa	UTC-1	November
UTC+2	Beta	UTC-2	Oscar
UTC+3	Charly	UTC-3	Papa
UTC+4	Delta	UTC-4	Quebec
UTC+5	Eco	UTC-5	Romeo
UTC+6	Foxtrot	UTC-6	Sierra
UTC+7	Golf	UTC-7	Tango
UTC+8	Hotel	UTC-8	Uniform
UTC+9	India	UTC-9	Whiskey
UTC+10	Kilo	UTC-10	X-Ray
UTC+11	Lima	UTC-11	Yankee
UTC±12	Mike	-	-

Cuadro 3.5: Correspondencias de husos horarios (2017)

te a cada huso. La hora correspondiente a cada huso se puede nombrar de diferentes formas. La más empleada en la actualidad en el mundo civil es la denominada Universal Time Cordinate (UTC). Esta se refiere a la hora civil generalmente que solemos tener en nuestras ciudades así, si estamos en el huso horario UTC+1 nos encontramos ante la hora correspondiente al meridiano de Greenwich más una hora. De igual forma, si vemos UTC-2 nos encontraremos dos husos al Oeste del huso centrado sobre el meridiano de Greenwich.

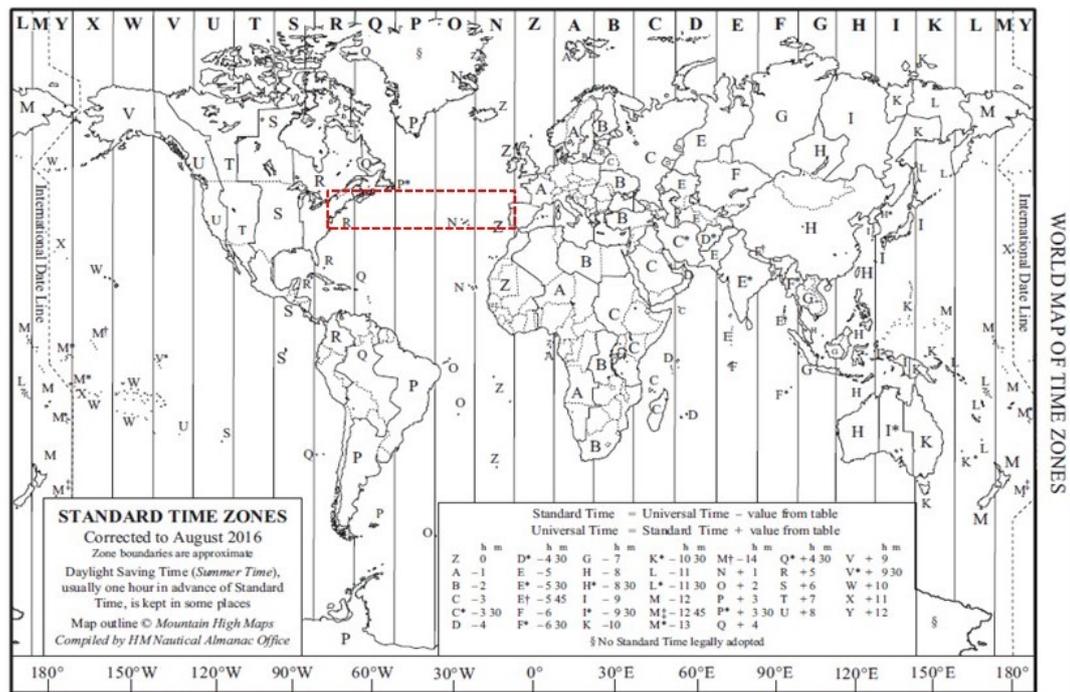


Figura 3.13: Mapa de husos horarios área del viaje. Elaboración propia (2016)

En navegación marítima y aérea de unidades militares se emplea el denominado huso horario militar Zulu (Z) que se corresponde con el huso horario UTC ± 0 sin considerar el cambio horario de verano. Así, el horario UTC+1 se corresponde con el huso militar Alfa (A) el horario UTC-1 se corresponde con el huso militar November (N). El cuadro 3.5 muestra la equivalencia entre la hora UTC empleada en el mundo civil y la del huso militar Zulu. Debemos tener presente que los horarios UTC pueden sumar la variación verano en el cual se adelanta una hora sobre el horario normal de invierno UTC por el contrario, el horario militar no considera los cambios horarios de verano. La figura 3.13 muestra el mapa global con todos los usos horarios y el sector en el que se desarrollo la navegación a Norfolk que sirve como ejemplo para identificar los elementos que estamos introduciendo en estos apartados y que, son de igual aplicación para el resto de viajes analizados.

### 3.3.3. Cálculo de las distancias recorridas sobre el Globo

Para poder determinar las distancia entre puntos sobre el globo terrestre es necesario emplear funciones de trigonometría esférica. La distancia entre dos puntos de la esfera se denomina ortodrómica que es un arco de circunferencia máxima. Las circunferencias máximas se corresponden con circunferencias de radio máximo igual al de la Tierra en nuestro caso así, todos los meridianos son circunferencias máximas y los paralelos son círculos menores a excepción del Ecuador terrestre que es también una circunferencia máxima. La longitud de estas circunferencias máximas es sencilla de calcular aplicando la fórmula de la longitud de una circunferencia, conocido el radio medio terrestre:

$$R_{\oplus} \approx 6,371 \text{ Km} \approx 3,440 \text{ millas}$$

La longitud de las circunferencias máximas será:

$$LM = 2\pi R_{\oplus} \approx 40,000 \text{ Km} \approx 21,598 \text{ millas}$$

De forma sencilla podemos determinar la distancia que corresponde a cada grado de circunferencia máxima dividiendo por 360° obteniendo así una distancia aproximada de 111 Km ó 60 millas. Las longitudes de las circunferencias menores o paralelos vendrán dadas por la ecuación general:

$$Lm = 2\pi R_{\oplus} \cos \varphi \tag{3.1}$$

Siendo en 3.1  $\varphi$  el valor en grados de latitud del paralelo denominándose la relación  $(90 - \varphi)$  colatitud. Hay que tener presente que en este caso la longitud de arco en cada grado será distinta y depende de la latitud del paralelo. De forma general el cálculo de la distancia entre dos puntos de una esfera se basa en las fórmulas que nos relacionan los ángulos de un triángulo esférico en el cual los tres arcos que los forman son parte de círculos máximos y tienen todos el mismo radio y así, mediante el teorema del coseno 3.2 y del seno 3.3 podemos calcular estos.

$$\cos c = \cos a \times \cos b + \sen a \times \sen b \times \cos C \tag{3.2}$$

$$\frac{\sen a}{\sen A} = \frac{\sen b}{\sen B} = \frac{\sen c}{\sen C} \tag{3.3}$$

Aplicando 3.4 podemos escribir la fórmula general que nos permita calcular la distancia entre dos puntos cualesquiera de la esfera así obtenemos una expresión de la forma:

$$\cos S_A^B = \cos (90 - \varphi_A) \times \cos (90 - \varphi_B) + \sen (90 - \varphi_A) \times \sen (90 - \varphi_B) \times \cos \lambda_A^B \tag{3.4}$$

En la figura 3.14 podemos ver de forma gráfica la fórmula anterior. Considerando el triángulo esférico formado por las colatitudes de A y B y el  $\Delta\lambda$  o ángulo ecuatorial que forman los meridianos de A y B. Aplicando la formulación anterior al viaje ejemplo y que forma parte de este estudio, podremos calcular las distancias recorridas teóricas y comprobar como se ajustan con las reales tomadas durante el mismo. En el cuadro 3.6 podemos ver las coordenadas geográficas de los puertos entre los que se desarrolló esta primera navegación oceánica de nuestro estudio en valor decimal y el huso horario en el que se localizan. Con estos datos podemos calcular las distancias entre puntos aplicando 3.4. En el cuadro 3.7 podemos ver las distancias entre estos puertos. Estas distancias son las distancias ortodrómicas que son a las que se ajustó el viaje como podemos ver referidos a los valores reales que se produjeron.

Coordenadas geográficas	Latitud	Longitud	Huso
Ferrol, Galicia (España)	43,50	-8,23	N
San Miguel, Azores (Portugal)	37,77	-25,47	O
Norfolk, Virginia (EE.UU)	36,85	-76,27	R
Halifax, Nueva Escocia (Canadá)	44,65	-63,60	Q

Cuadro 3.6: Coordenadas geográficas de los puertos (2016)

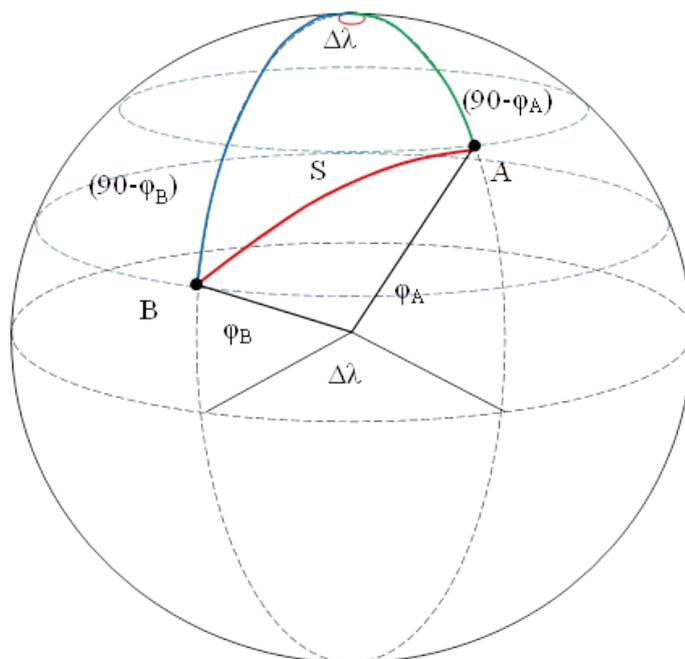


Figura 3.14: Definición del triángulo esférico. Elaboración propia (2016)

Tránsitos	Ortodrómica	Real recorrida	Diferencia (%)
Ferrol-San Miguel	855	898	5,05
San Miguel-Norfolk	2.394	2.645	10,46
Norfolk-Halifax	740	792	7,00
Halifax-Ferrol	2.340	2.365	1,01
<b>Totales</b>	<b>6.329</b>	<b>6.700</b>	<b>4,96</b>

Cuadro 3.7: Distancias reales (nm) (1,852 m). Elaboración propia (2016)

Del análisis de los datos de distancias calculadas matemáticamente con trigonometría esférica, comprobamos que estas difieren valor medio porcentual del 4,96% inferior al realmente recorrida por el buque. Hay que tener presente que las condiciones meteorológicas en la navegación entre San Miguel y Norfolk fueron adversas en muchas ocasiones y obligaron a variar el rumbo en ocasiones para evitar situaciones que retrasarían el viaje con respecto a lo previamente establecido.

También hay que tener presente que los buques, a diferencia de lo que ocurre en el transporte terrestre, no tienen vías establecidas que permitan ajustarse a un recorrido fijo así, las vías marítimas estas sujetas a cambios constantes lo que hace que para una misma navegación, el tiempo empleado o el recorrido hecho no sean siempre iguales.

En navegación se juega siempre con estimaciones basadas en las condiciones meteorológicas y sus predicciones, los estados del mar y, en ocasiones, las imposiciones normativas de mantener ciertos rumbos para preservar la seguridad y evitar accidentes en zonas de tráfico denso como pueden ser el corredor costero del Atlántico frente a las costas gallegas o para el tránsito por el estrecho de Gibraltar, por los que debe navegarse usando las zonas señalizadas en las cartas sin poder salirse de estas al uso de lo que se hace cuando conducimos un vehículo por una carretera.

### 3.3.4. Descripción de los desplazamientos respecto del tiempo

Como ya hemos comentado anteriormente, el buque se ha desplazado de forma continua sobre una gran superficie del océano Atlántico. El viaje comienza en Arsenal Militar de Ferrol, y finaliza 51 días después en el mismo puerto después de recorrer 6.392 millas marinas en los tránsitos y 461 millas en los ejercicios realizados en aguas territoriales de EE.UU. que suman un total de 6.863 millas equivalentes a 12.710 Km.

Durante este tiempo el buque se desplazó desde Ferrol hasta la isla de San Miguel en el archipiélago de las Azores de soberanía portuguesa para desde allí, poner rumbo a la base naval de Norfolk en el estado de Virginia en EE.UU. En este puerto permaneció un largo periodo dentro del cual realizó ejercicios de lanzamiento de misiles. Del puerto de Norfolk se desplazó al de Halifax en Canadá. El tiempo empleado en cada uno de los tránsitos, y las estadias en puerto se ven reflejadas en el cuadro 3.8. La figura 3.15 muestra las coordenadas geográficas que podemos ver en el cuadro

Situación geográfica	Días
Tránsito Ferrol-San Miguel	3
Puerto de San Miguel	2
Tránsito San Miguel-Norfolk	8
Puerto de Norfolk	16
Pruebas de lanzamiento EE.UU.	4
Puerto de Norfolk	3
Ejercicios de lanzamiento EE.UU	3
Tránsito Norfolk-Halifax	2
Puerto de Norfolk	2
Tránsito Halifax-Ferrol	8
Total de días	51

Cuadro 3.8: Duración de la primera navegación oceánica. Elaboración propia (2016)

3.12 como expansión del sector esférico del Globo que abarca desde el meridiano 0 al 80 Oeste (-80 decimal) y desde el Ecuador o paralelo 0 hasta el paralelo 50 Norte (50 decimal). Vemos también representados los husos horarios en los que se ha encontrado el buque durante el viaje largo de la navegación.

La poligonal en rojo delimita la trayectoria seguida por el buque en su navegación y no se representan los desplazamientos realizados en las aguas territoriales de EE.UU. por haberse hecho estos en un área muy pequeña sobre el conjunto del total y poder considerarse puntuales en proporción a las distancias recorridas en los tránsitos. Hemos representado la longitud en el eje de ordenadas y la latitud en el de abscisas saltándonos la convención tradicional que es la seguida en la tabla nº 2 en la que se debe dar antes el valor de latitud seguido del de longitud. Como ya hemos dicho, cada huso horario se corresponde con un arco terrestre de 15° de circunferencia por lo que si nos fijamos en la figura 3.15 podemos ver unas líneas más gruesas que delimitan estos sobre la expansión del sector de superficie esférica sobre el que se ha desarrollado el viaje. Por convención los husos horarios se distribuyen tomando como punto de partida el meridiano de Greenwich o meridiano cero sobre el que centramos el primer huso es decir, marcando 7,5° a Este y Oeste del semimeridiano. A partir de ahí se distribuye regularmente arcos de 15° que irán

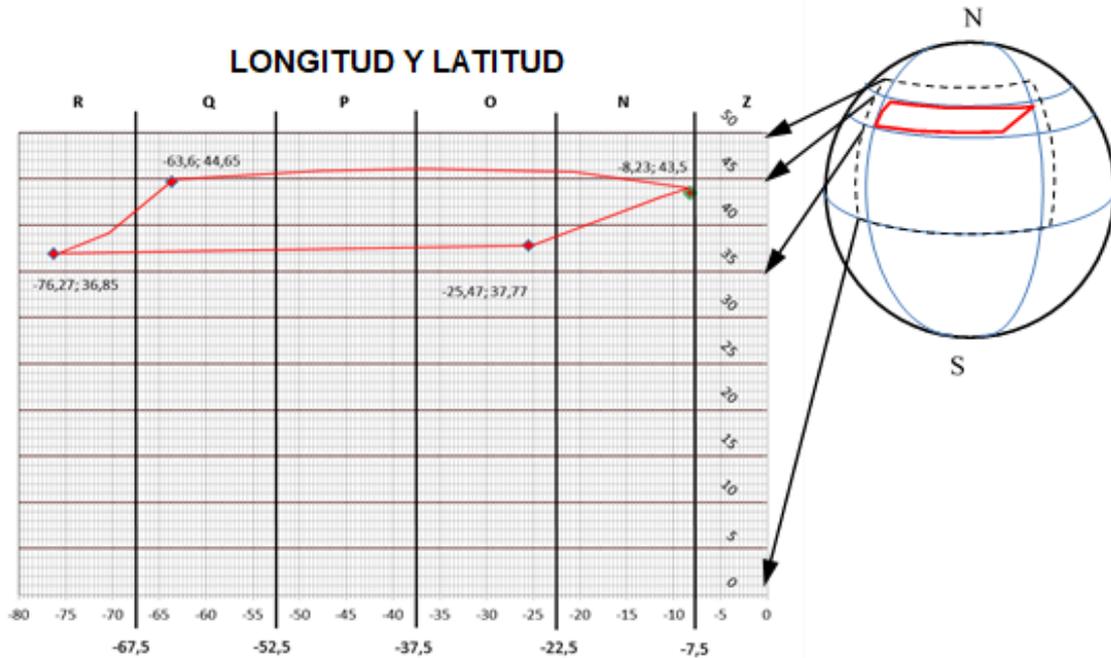


Figura 3.15: Área sobre la que se desarrolló el tránsito. Elaboración propia (2016)

definiendo los 24 husos horarios. La hora oficial de España es la correspondiente a la del meridiano de Greenwich más una hora denominada por convención horario UTC+1 es decir, llevamos la denominada hora de Europa del Oeste que es la correspondiente al huso horario militar denominado Alfa (A). La hora de salida de Ferrol fue según el horario correspondiente al huso horario (A) a las 12:00 horas del día 12 de junio. Este horario se retrasó en dos horas pasando a ser las 10:00 horas de la mañana del mismo día. A la llegada a Azores el día 15, se mantiene el horario (UTC-1). En Azores se produce el segundo cambio horario restándose una hora así, a las 08:00 del día 17 de junio pasaron a ser las 07:00 horas coincidiendo con el huso horario militar Oscar (O) en el que se encuentran situadas las Azores. Este horario se prolonga hasta las 17:00 horas del día 19 de junio, retrasándose una hora y pasando a horario de huso Papa (P) siendo entonces las 16:00 horas del mismo día 19 de junio. El horario (P) se mantiene hasta el día 21 de junio a las 17:00 momento en el cual se procede a retrasar otra hora, desplazando así el horario a las 16:00 del huso Quebec (Q). Se mantiene este horario hasta las 17:00 del día 22 de junio que es cuando se produce un retraso de una hora más para adaptarnos a la hora local de Norfolk que es (UTC-6). EL cuadro 3.9 muestra los días y la hora a la que se produjeron los cambios horarios para el viaje de ida desde el Arsenal de Ferrol hasta la Isla de San Miguel en Azores, y de ahí a la Base Naval de Norfolk (EE.UU.). Tras la estancia en EE.UU. el buque navega a Halifax (Canadá), y desde este aquí emprende regreso a su base en Ferrol.

Para el viaje de vuelta los cambios horarios se produjeron de la siguiente forma. A la salida de Norfolk el día 24 de julio de 2016 se navegó en demanda de puerto de Halifax en la región de Nueva Escocia (Canadá, siguiendo el horario de Norfolk (UTC-6). A la llegada al puerto de Halifax se produce el primer adelanto de hora a las 11:00 horas (UTC-5), pasando a ser las 12:00 del día 24 de julio. Este horario se

### 3.3. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO GEOGRÁFICO Y TEMPORAL

Día	Hora	Cambio	Hora	A huso	De huso	Lat./long.	Nº h.
12 junio	12:00	-2 h.	10:00	O	A	43,50/-08,23	117
17 junio	08:00	-1 h.	07:00	P	O	37,77/-25,47	58
19 junio	17:00	-1 h.	16:00	Q	P	38,00/-44,00	35
21 junio	17:00	-1 h.	16:00	R	Q	37,00/-56,00	24
22 junio	17:00	-1 h.	16:00	S	R	37,00/-70,00	762
24 julio	11:00	+1 h.	12:00	R	S	36,85/-76,27	44
26 julio	10:00	+2 h.	12:00	P	R	44,65/-63,60	77
29 julio	17:00	+1 h.	18:00	O	P	45,00/-47,00	23
30 julio	17:00	+1 h.	18:00	N	O	45,50/-35,00	22
31 julio	16:00	+1 h.	17:00	A	N	44,00/-24,00	41

Cuadro 3.9: Cambios de hora en el viaje de ida y vuelta. Elaboración propia (2016)

mantiene hasta las 10:00 horas del día 26 de julio de 2016, que es cuando se produce un adelanto de dos horas, pasando a ser las 12:00 del huso horario (P). Se mantiene este horario hasta las 17:00 horas del día 29 de julio, adelantándose otra hora y pasando a ser las 18:00 correspondientes con el huso horario (O). El siguiente adelanto horario se produce a las 17:00 horas del día 30 de julio pasando a ser las 18:00 de huso horario (N) y por último, a las 16:00 del día 31 de julio de 2016, se produce el ajuste horario a (UTC+1) correspondiente con horario de España. La tabla nº 5 muestra además la situación geográfica en la que se decidió establecer el cambio de hora tanto para el viaje de ida como para el de vuelta.



Figura 3.16: Puntos de cambio horario. Elaboración propia (2016)

En la figura 3.16 se muestra un plano de husos horarios y los cambios horarios acumulados que se fueron haciendo tanto para el viaje de ida como de vuelta. La misma ilustración muestra los puertos que se tocaron en la navegación y los cambios horarios en color azul para la ida y rojo para la vuelta. Los rombos amarillos marcan los cambios horarios efectuados en movimiento y los cambios de hora en puerto con un punto morado o granate.

Podemos ver que los cambios horarios no se han efectuado de forma regular y tampoco se han realizado ajustándose exactamente a los husos horarios por los que se

pasaba. De igual forma en los puertos se ha respetado la hora oficial así, por ejemplo, en el puerto de Norfolk se usa la hora de verano UTC+6 que se corresponde con el huso Sierra (S) si bien este puerto se encuentra situado en el huso horario Romeo (R) de huso horario militar. De esta forma, en la toma de datos se van a dar las temperaturas ambientales más elevadas no en el medio día solar sino en horarios desplazados, si bien aparecerán siempre en las horas centrales del día, es decir, entre las 10:00 y las 14:00.

#### 3.3.5. Caracterización de los desplazamientos oceánicos

A la vista de la caracterización general espacio temporal de este viaje a EE.UU., podemos afirmar en todos los viajes analizados, que esto implican grandes desplazamientos sobre el Globo por lo que, habrá que tener presentes las siguientes cuestiones:

1. El sistema (buque) estudiado se encuentra en movimiento, desplazándose en un amplio espacio del océano Atlántico en el primero de los desplazamientos de larga distancia analizados el cual, está enmarcado entre las latitudes 43° Norte hasta la 36° Norte y las longitudes 8° Oeste y 77° lo que representa una extensión de miles de Km cuadrados.
2. Las distancias mínimas teóricas recorridas en los desplazamientos basadas en cálculos de trigonometría esférica de círculos máximos y coinciden en la práctica con los reales efectuados por el buque entre los distintos puertos con una variación en desplazamiento inferior al 5%.
3. Este desplazamiento dentro de un sector del Globo tan extenso, ha obligado a efectuar ajustes horarios debido al movimiento de rotación terrestre representado el desplazamiento de este primer viaje oceánico una diferencia horaria de UTC+1 y UTC+6.
4. Los cambios horarios han sido efectuados sin tener presente exactamente la zona del globo en la que se encontraba el buque en cada momento por lo que las horas de máxima temperatura ambiente por ejemplo, esperadas entre las 14:00 y las 16:00 horas en construcciones inmóviles, oscilarán en una horquilla más amplia que va de las 10:00 y las 17:00 ya que los cambios horarios en los que se retrasa la hora se hacen antes de llegar a la zona a la que realmente corresponde, adelantándose la hora de máxima temperatura y por el contrario, en los adelantos horarios se retrasará con respecto a la zona a la que corresponde la hora ajustada.
5. Lo anterior, no supone un obstáculo a la hora de la toma de datos, pues lo que los datos son reales en cada momento y el ajuste horario no afecta a los valores que se presentan en cada momento. De esta forma podemos decir que los cinco elementos o características del primer viaje se pueden extrapolar como hemos dicho al principio a cualquier otro viaje analizado en esta tesis y que describimos a continuación de forma somera.

### 3.4. Los viajes

En esta tesis se ha procedido al análisis de los siguientes viajes que ordenamos cronológicamente. La toma de datos comienza por un primer análisis corto que ha sido empleado como elemento de partida en el estudio de esta tesis y, posteriormente, la base de datos se ha ido ampliando con viajes oceánicos más cercanos en el tiempo. Estos viajes han sido los siguientes:

1. Periodo de prueba del buque en aguas costeras de Galicia, efectuado y que ha servido como elemento inicial de análisis para establecer las hipótesis y objetivos de la tesis.
2. Tránsito desde Cádiz a Ferrol efectuado tras su evaluación operativa. El periodo de garantía tiene una duración de un año de forma general para el buque y sus sistemas y no puede desplegarse en operaciones fuera de aguas nacionales.
3. Viaje transatlántico Ferrol-Azores-Norfolk-Halifax y regreso de 2016. Este viaje supuso un hito de gran importancia puesto que sirvió para validar la capacidad de lanzamiento de misiles y determinar así la validez del buque para realizar de forma eficaz las misiones para las que fue creado.
4. Viaje a Australia. Con las siguientes etapas:
  - a) Viaje Ferrol-Estrecho de Gibraltar-Canal de Suez, Yedda (Arabia Saudí) 2017. Este supone la primera etapa de un viaje de circunnavegación del Globo enmarcando un despliegue en Australia.
  - b) Viaje de Yedda a Bombay (India) como segunda etapa del viaje.
  - c) Viaje de Bombay-Mumbai a Singapur (Singapur) es la tercera de las etapas.
  - d) Viaje de Singapur a Perth (Australia) cuarta etapa y última del viaje a Australia.
  - e) viaje de Perth a Perth / Stirling (Australia) en el que se encuadra la primera de las navegaciones de colaboración con la marina Australiana en 2017.

La figura 3.17 podemos ver los desplazamientos que efectuó el buque donde los números se refieren a puertos que marcan el final y el comienzo de las distintas etapas. Se corresponden con los siguientes:

- Arsenal Militar de Ferrol (España) (1)
- Isla de San Miguel en Azores (Portugal) (2)
- Base Naval de Norfolk (EE.UU.) (3)
- Arsenal de Halifax (Canadá) (4)
- Estrecho de Gibraltar (5)
- Canal de Suez (Egipto) (6)
- Puerto de Yedda (Arabia Saudí) (7)

- Puerto de Bombay (India) (8)
- Puerto de Singapur (9)
- Arsenal de Perth/Stirling (Australia) (10)

No hemos representado los primeros viajes por razones de escala es decir, los correspondientes a las pruebas en aguas costeras de Galicia y el de tránsito de Cádiz a Ferrol.

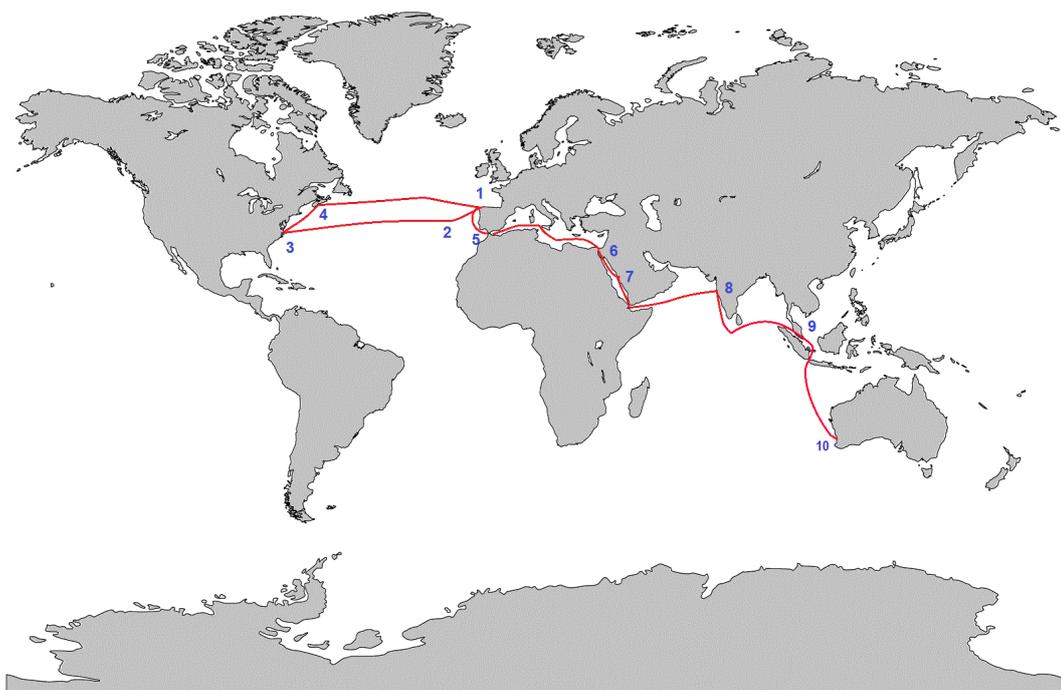


Figura 3.17: Viajes analizados en el estudio. Elaboración propia (2017)

### 3.5. Variables consideradas

Para cada uno de los viajes se procedió a elaborar una base de datos compuesta por valores de variables ambientales interiores y exteriores, datos de consumos de combustibles para la propulsión y generación, datos de producción eléctrica y variables relacionadas con la navegación con velocidad del buque y rumbo.

Estas variables no fueron las mismas en todos los casos, de hecho se comenzó por un grupo reducido de estas y, las variables, fueron aumentando en número a medida que avanzaba el estudio y análisis de estas. De forma pormenorizada las variables que se tomaron en cada viaje y su horquilla temporal es la siguiente:

1. **Periodo de pruebas en Ferrol:** en este periodo se toman valores de las siguientes variables cuantitativas:
  - a) Hora: con los valores de día y hora a intervalos de una hora con un total de 192 muestras del resto de las variables.
  - b) Producción eléctrica (*PT*) en kWh.

- c) Temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - d) Temperatura del aire ( $T_a$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
  - e) Humedad relativa ( $HR$ ) en porcentaje.
  - f) Temperatura de la cámara de máquinas n $^{\circ}$ 1 ( $T_{CM1}$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
  - g) Temperatura de la cámara de diésel generadores n $^{\circ}$ 2 ( $T_{DG2}$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
  - h) Temperatura del lanzador de misiles VLS ( $T_{VLS}$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
2. **Tránsito desde Cádiz a Ferrol:** en este viaje se toman valores de las siguientes variables:
- a) Hora: con los valores tomados cada 20 minutos como intervalo temporal con un total de 145 muestras para el resto de las variables.
  - b) Consumo eléctrico total ( $PT$ ) en kWh y producción eléctrica de cada uno de los diésel generadores también en kWh con los nombres de PDG1A, PDG1B, PDG2A y PDG2B.
  - c) Consumo de combustible de los DD.GG. ( $C_{DG}$ ) en litros hora ( $l/h$ ).
  - d) Consumo de combustible de la propulsión de los MM.PP. ( $C_{MP}$ ) en litros hora ( $l/h$ ).
  - e) Velocidad sobre el agua en nudos ( $v_{sa}$ ) Unidad para la velocidad en nudos del inglés “knot” (kn).
  - f) Distancia recorrida ( $S$ ) en millas náuticas ( $nm$ ).
  - g) Temperatura del agua de mar en proa ( $T_{am-pr}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - h) Temperatura del agua de mar en popa ( $T_{am-pp}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - i) Temperatura del aire (exterior) ( $T_a$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
  - j) Humedad relativa ( $HR$ ) en porcentaje.
3. **Viaje transatlántico 2016:** este viaje se desarrolla en un amplio periodo de entre el 12 de junio y el 2 de agosto de 2016 cruzando el Atlántico; las variables consideradas en este viaje fueron las siguientes:
- a) Hora: se toma fecha y hora teniendo presente el cambio horario a intervalos de una hora con un total de 1.221 muestras del resto de las variables.
  - b) Consumo eléctrico total en kWh y producción eléctrica desglosada de cada uno de los diésel generadores también en kWh expresados como PDG1A, PDG1B, PDG2A y PDG2B. En las fechas que se encuentra en puerto, al encontrarse el buque con corriente de tierra, el valor es el total y se ha tomado en Amperios por hora ( $A/h$ ) traduciendo este valor a kWh.
  - c) Consumo eléctrico del sistemas de HVAC notada como PHVAC.
  - d) Consumo de combustible de los DD.GG. en litros hora ( $l/h$ ).
  - e) Consumo de combustible de la propulsión de los MM.PP. en litros hora ( $l/h$ ).
  - f) Velocidad sobre el agua en nudos  $v_{sa}$  kn.

- g) Distancia recorrida ( $S$ ) en millas náuticas ( $nm$ ).
  - h) Temperatura del agua de mar en proa ( $T_{am-pr}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - i) Velocidad relativa del viento ( $v_{RV}$ ) en kn.
  - j) Dirección relativa del viento ( $D_{RV}$ ) en grados ( $^{\circ}$ ).
  - k) Temperatura del agua de mar en proa ( $T_{am-pr}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - l) Temperatura del agua de mar en popa ( $T_{am-pp}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - m) Temperatura del aire (exterior) ( $T_a$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
  - n) Humedad relativa ( $HR$ ) en porcentaje.
  - ñ) Temperatura de las cámaras de máquinas n $^{\circ}$ 1 y n $^{\circ}$ 2 ( $T_{CM1}$ ) y ( $T_{CM2}$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
  - o) Temperatura de las cámaras de diésel generadores n $^{\circ}$ 1 y n $^{\circ}$ 2 ( $T_{DG1}$ ) y ( $T_{DG2}$ ) en ( $^{\circ}C$ ). Temperaturas de los locales de equipos auxiliares de máquinas n $^{\circ}$ 1 a n $^{\circ}$ 4 ( $T_{AUX1}$ ), ( $T_{AUX2}$ ), ( $T_{AUX3}$ ) y ( $T_{AUX4}$ )
4. **Viaje oceánico a Australia 2017:** este viaje implicó un desplazamiento que discurrió por el océano Atlántico, mar Rojo y océano Índico además, se han considerado solo los datos de desplazamiento; el viaje comenzó en Ferrol en enero de 2017 y finaliza en marzo de 2017 en el puerto de Perth (costa Este de Australia). Las variables consideradas en este viaje fueron las siguientes:
- a) Hora: se toma fecha y hora teniendo presente el cambio horario a intervalos de una hora divididos en 5 etapas descritas en la sección 3.4 con un total del 984 tomas de datos de las variables.
  - b) Consumo eléctrico total en kWh y producción eléctrica desglosada de cada uno de los diésel generadores también en kWh con los nombres para cada uno de los motores expresados como PDG1A, PDG1B, PDG2A y PDG2B. En las fechas que se encuentra en puerto, al encontrarse el buque con corriente de tierra, el valor es el total y se ha tomado en Amperios por hora ( $A/h$ ) traduciendo este valor a kWh.
  - c) Consumo eléctrico del sistemas de HVAC.
  - d) Consumo de combustible de los DD.GG. en litros hora ( $l/h$ ).
  - e) Consumo de combustible de la propulsión de los MM.PP. en litros hora ( $l/h$ ).
  - f) Velocidad sobre el agua ( $v_{sa}$ ) en kn.
  - g) Velocidad sobre el fondo ( $v_{sf}$ ) en kn.
  - h) Distancia recorrida ( $S$ ) en millas náuticas ( $nm$ ).
  - i) Rumbo sobre el fondo del buque en grados ( $R_{sf}$ ) en grados ( $^{\circ}$ ).
  - j) Temperatura del agua de mar en proa ( $T_{am-pr}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - k) Temperatura del agua de mar en popa ( $T_{am-pp}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
  - l) Velocidad real del viento ( $v_{RAV}$ ) en kn.

- m) Dirección relativa del viento ( $D_{RV}$ ) en grados ( $^{\circ}$ ).
- n) Dirección real del viento ( $D_{RAV}$ ) en ( $^{\circ}$ ).
- ñ) Temperatura del agua de mar en popa ( $T_{am-pp}$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).
- o) Temperatura del aire (exterior) ( $T_a$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
- p) Humedad relativa ( $HR$ ) en porcentaje.
- q) Temperatura de las cámaras de máquinas nº1 y nº2 ( $T_{CM1}$ ) y ( $T_{CM2}$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
- r) Temperatura de las cámaras de diésel generadores nº1 y nº2 ( $T_{DG1}$ ) y ( $T_{DG2}$ ) en ( $^{\circ}C$ ).
- s) Temperaturas de los locales de equipos auxiliares de máquinas nº1 a nº4 ( $T_{AUX1}$ ), ( $T_{AUX2}$ ), ( $T_{AUX3}$ ) y ( $T_{AUX4}$ ).

En el cuadro 3.10 mostramos de forma más gráfica las variables que hemos considerado en cada uno de los periodos analizados. Haremos referencia a cada uno de los viajes con los acrónimos siguientes:

1. V. Ferrol: navegación de prueba en aguas de Ferrol.
2. V. Cádiz: navegación de Cádiz a Ferrol.
3. V. EE.UU.: navegación trasatlántica de Ferrol, Azores, Norfolk, Halifax y regreso en el verano de 2016.
4. V. Australia: navegación oceánica de Ferrol a Australia en 2017 en invierno del Hemisferio Norte y verano del Hemisferio Sur.

En la tabla 3.10 podemos ver los viajes en las columnas y en las filas las variables registradas en cada uno de los viajes; a la derecha se emplean los acrónimos de las variables y sus unidades que hemos ido describiendo a lo largo de este apartado y como se puede ver no siempre se han tomado datos de las mismas variables así, las únicas variables que se repiten en todas las tomas de datos se corresponden con las de potencia total y las climáticas de temperatura del aire, humedad relativa y temperatura del agua de mar.

Para aclarar el significado de algunas de las variables, presentamos la figura 3.18 en la misma podemos ver a la derecha como se miden los valores del rumbo del buque con respecto a los puntos cardinales. El Norte se corresponde con cero grados y así, el rumbo del buque se dará según el ángulo notado con la letra “ $a$ ” en el dibujo de la derecha siendo positivo en el sentido de las agujas del reloj y negativo en el contrario. La dirección del viento se da con respecto a los ejes coordenados propios del buque, representado los cero grados la proa del barco y dando el valor positivo en el mismo sentido de las agujas del reloj. La composición del viento real “ $v_r$ ” con la velocidad sobre el fondo del buque “ $v_b$ ” nos da el valor de la velocidad del viento aparente “ $v_a$ ” y su valor de velocidad. La variable de velocidad sobre el fondo, es el valor real de la velocidad del buque, siendo la velocidad relativa el valor corregido con el valor de la velocidad longitudinal de la corriente. El resto de componente de consumo y temperaturas no requieren de mayor explicación pues las unidades consideradas explican claramente su significado físico.

### 3.5. VARIABLES CONSIDERADAS

Acronímico	Unidad	V. Ferrol	V.Cádiz	V. EE.UU.	V. Australia
<i>PDG1A</i>	kW/h		X	X	X
<i>PDG1B</i>	kW/h		X	X	X
<i>PDG2A</i>	kW/h		X	X	X
<i>PDG2B</i>	kW/h		X	X	X
<i>PT</i>	kW/h	X	X	X	X
<i>PHVAC</i>	kW/h			X	
<i>C<sub>DG</sub></i>	l/h		X	X	X
<i>C<sub>MP</sub></i>	l/h		X	X	X
<i>v<sub>sa</sub></i>	kn		X	X	X
<i>v<sub>sf</sub></i>	kn				X
<i>R<sub>sf</sub></i>	°				X
<i>S</i>	nm		X	X	X
<i>HR</i>	%	X	X	X	X
<i>T<sub>am-pp</sub></i>	°C		X	X	X
<i>T<sub>am-pr</sub></i>	°C		X	X	X
<i>T<sub>am</sub></i>	°C	X	X	X	X
<i>T<sub>a</sub></i>	°C	X	X	X	X
<i>v<sub>RAV</sub></i>	kn				X
<i>v<sub>RV</sub></i>	kn			X	
<i>D<sub>RAV</sub></i>	°				X
<i>D<sub>RV</sub></i>	°			X	X
<i>T<sub>AUX1</sub></i>	°C			X	X
<i>T<sub>AUX2</sub></i>	°C			X	X
<i>T<sub>AUX3</sub></i>	°C			X	X
<i>T<sub>AUX4</sub></i>	°C			X	X
<i>T<sub>DG1</sub></i>	°C			X	X
<i>T<sub>DG2</sub></i>	°C	X		X	X
<i>T<sub>CM1</sub></i>	°C	X		X	X
<i>T<sub>CM2</sub></i>	°C			X	X
<i>T<sub>VLS</sub></i>	°C	X			

Cuadro 3.10: Tabla de variables por viaje. Elaboración propia (2018)

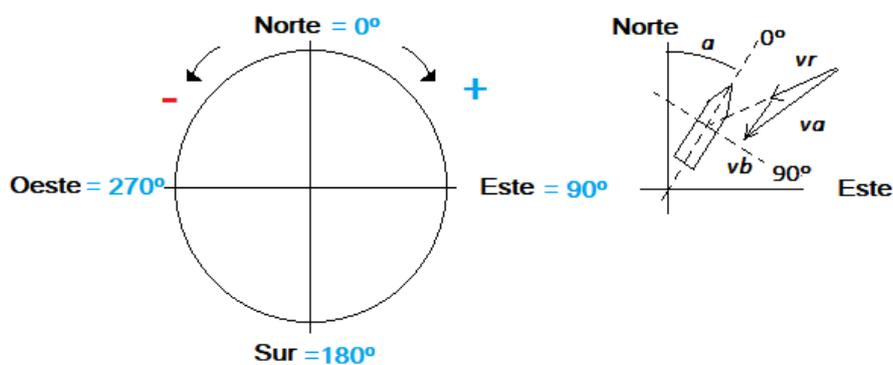


Figura 3.18: Rumbo y velocidad. Elaboración propia (2017)

## 3.6. Herramientas empleadas en la toma de datos

Tres han sido las herramientas fundamentales empleadas para la toma de datos de las variables consideradas en el trabajo de campo:

1. El Sistema Integrado de Control de Plataforma del buque SICP.
2. La estación meteorológica del buque integrada con el anterior.
3. Listados de consumo de combustible y temperatura de locales no integrados en el SICP.

### 3.6.1. El SICP

La toma de datos se ha efectuado empleando fundamentalmente el SICP del buque encargado de gestionar las señales de todos los sistemas del buque. Las variables tanto interiores como exteriores que recibe las señales de sistemas integrados en el mismo.

El SICP es un sistema desarrollado por la empresa estatal Navantia [196] tanto a nivel de programación como de componentes (software y hardware) encaminado a facilitar tres funciones básicas que son:

- Automatización. Esta funcionalidad nos facilita procesos automáticos que agilizan el uso de los sistemas y la toma de decisiones sin la participación directa de los individuos.
- Control. Fundamentalmente para el control de procesos que facilitan el posterior análisis de la información recogida.
- Supervisión. Lo que nos permite vigilar el funcionamiento del sistema para mantenerlos dentro de parámetros aceptables y satisfactorios.

El SICP ha sido fabricado con componentes comerciales buscando el abaratamiento de su producción, uso y mantenimiento posterior con el fin de reducir el coste de su ciclo de vida.

El SICP nos permite actuar como interfaz del hombre con la máquina y así podemos obtener información en tiempo real, representación de gráficos y diagramas de tendencia para distintas variables y almacenar datos entre otras funcionalidades.

### Integración de los datos en el SICP

Como ya hemos dicho, el buque está dotado de un sistema centralizado de captación y almacenamiento de datos del buque. Los datos que se registran son tanto datos meteorológicos como de condiciones termo higrométricas interiores, consumos de los motores, datos de navegación (velocidad del buque, rumbo, dirección relativa del viento etc). Los datos son tomados dependiendo de las variables, cada 5-10 segundos como norma pero, las variaciones que se puedan dar también son registradas cuando estas son considerables y son almacenadas para su control por parte de la tripulación a través de las consolas de operación del buque donde pueden visualizar estas en tiempo real o en modo histórico para su análisis. En la figura 3.19 podemos ver cómo se pueden presentar los datos en uno de los monitores así,

### 3.6. HERRAMIENTAS EMPLEADAS EN LA TOMA DE DATOS

en este caso, se ven elementos de navegación y del motor principal donde se pueden ver pequeñas ventanas de datos sobre las que se puede pinchar para desplegar una ventana en la que podemos seleccionar visualizar datos en tiempo real como en la figura 3.20, o históricos como los que podemos ver en la figura 3.21.



Figura 3.19: Presentación de datos de navegación. Foto de pantalla (2017)



Figura 3.20: Presentación de datos en tiempo real. Foto de pantalla (2017)



Figura 3.21: Presentación datos históricos múltiples. Foto de pantalla (2017)

Si consideramos sistemas concretos como el HVAC, el SICP nos permite abrir pantallas específicas como se puede ver en la figura 3.22 en la que aparece en segundo plano el anillo general del sistemas y en primer plano el menú flotante de una de las estaciones de agua fría. En el caso de estas, los valores de consumo no se encuentran reflejados en el sistema y cuando se tomaron, fue necesario hacerlo en las propias plantas en su menú local de forma manual. La figura 3.23 muestra el perfil de buque en su tercio de popa con los sensores de temperaturas en el interior de los locales representados.

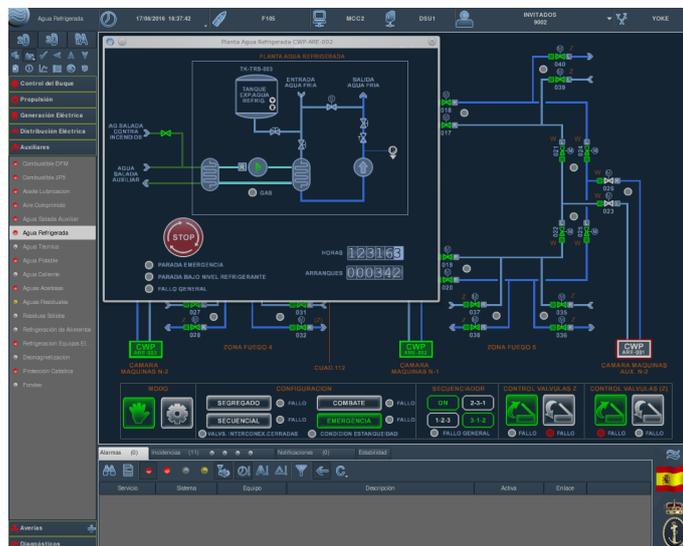


Figura 3.22: Presentación sistema HVAC. Foto de pantalla (2017)

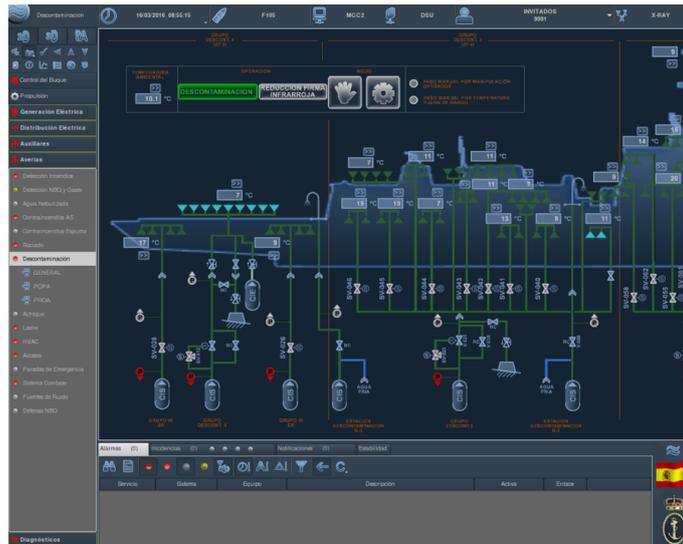


Figura 3.23: Presentación control de temperatura. Foto de pantalla (2017)

La monitorización de los datos se efectúa en el caso de todos los sensores por medio de Remote Terminal Unit (RTU) (unidades de control remoto) en las que se centralizan grupos de señales para ser enviadas al ordenador central y, desde las que se envían las señales analógicas tomadas por los sensores, al SICP; estas se pueden extraer desde las consolas de interfaz humano dispuestas en distintos locales del buque como puede ser la central del máquinas, la central secundaria máquinas, los trozos de seguridad interior y el centro de información en combate (CIC). Este sistema permite conocer en tiempo real los valores de cada una de las variables almacenando un dato cada 5 ó 10 segundos como ya hemos dicho, pero no toma decisiones sobre el funcionamiento de los sistemas. Al SICP también llegan los datos de las condiciones ambientales exteriores que centraliza el sistema DIANA. En la figura 3.24 podemos ver un esquema simplificado de la transmisión de la información entre los distintos sistemas donde 2PD, es un termo par que trabaja entre temperaturas mínima y máxima genérico, el SCIP es Sistema Integrado de Control de Plataforma que se traduce al inglés como Integrated Platform Management System (ICMP) y el Temperature Transmission Junction (TTJ) que son las conexiones de los sensores de temperatura del agua de mar en tiempo real.

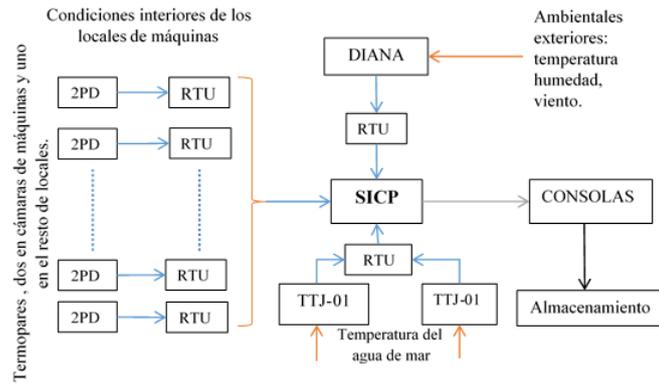


Figura 3.24: Esquema de la integración de datos. Elaboración propia (2017)

### 3.6.2. La estación meteorológica

La estación meteorológica empleada para la monitorización de los datos analizados en esta tesis, está compuesta por los siguientes elementos:

- Dos anemómetros uno en Babor y otro en Estribor de ultrasonidos en estado sólido (sin partes móviles).
- Un sensor de temperatura y humedad relativa integrado.
- Un barómetro para determinar la presión atmosférica.

Los elementos encargados de monitorizar y conectar los sensores anteriores son:

- Una interfaz meteorológica (Meteorological Interface Unit (MIU)) encargada de recoger las señales electrónicas generadas en cada uno de los sensores y distribuirlos al buque y al ordenador específico de monitorización de datos meteorológicos del sistema.
- Dos cables de interfaz 60M para la toma de datos de ambos anemómetros instalados.
- Un cable de datos gráficos (Graphical Umbilical Interface (GUI))
- Dos conexiones RS422 DB13 de salida de datos al buque que envían las señales al sistema integrado de control de señales que los distribuye a los distintos sistemas que necesitan de ellos.
- Una entrada NMEA de toma de datos de la velocidad del buque a donde llegan las señales de corredera de velocidad del buque para calcular la velocidad verdadera y dirección real del viento.
- Repetidores en color multifunción repartidos en distintos puntos del buque en los que se ven en tiempo real datos de velocidad, temperatura y dirección del viento que no están directamente conectados al MIU y que reciben la información del sistema integrado de datos del buque.

Dado que es un equipo diseñado para buques de guerra, el MIU tiene exigencias de funcionamiento muy altas y cumple con normas tan exigentes como son, condiciones térmicas de trabajo de -10 y 55°C y apagado hasta ambientes de 70°C o de humedad relativa de 85 % a 60°C además, cumple con requisitos de choque, vibraciones, radiación electromagnética y de alimentación eléctrica estipuladas por normativas militares de uso habitual en el diseño de equipos navales militares (NES 1004 Data Sheet 8-9, NES 1004 Data Sheet 25, DEFSTAN 5941, STANAG 1008). La figura 3.25 muestra de forma esquemática la composición de la estación meteorológica instalada en el buque. Todos los sensores se instalan en el palo del buque elevados, con sectores amplios libres de obstáculos y en aire puro que no se vea afectado por los gases de escape de los motores del buque como se puede ver en el esquema de la figura 3.26

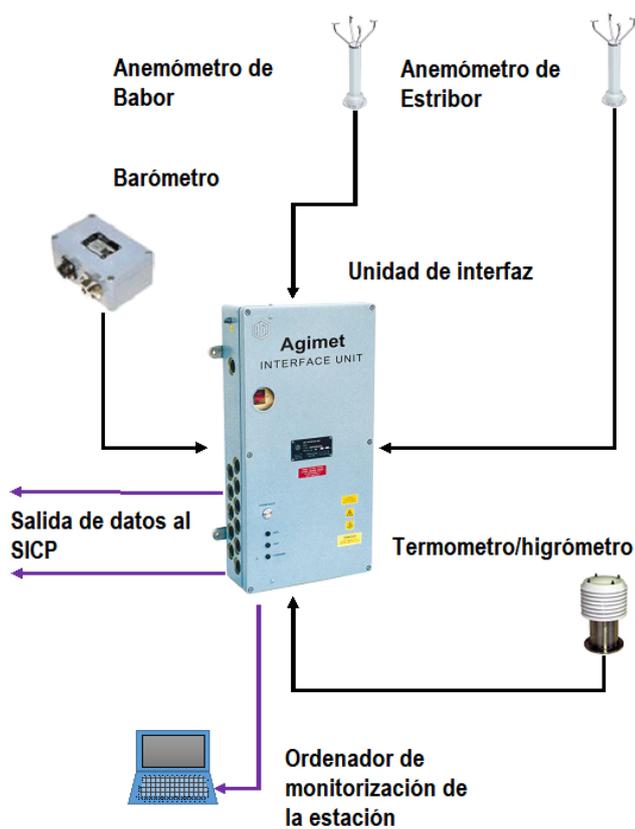


Figura 3.25: Esquema de la estación meteorológica. Elaboración propia (2017)



Figura 3.26: Ubicación de la estación meteorológica. Elaboración propia (2017)

#### Toma y transmisión de datos de la estación

La toma de datos se realiza por medio de los sensores T & RH y SPI (Temperatura Humedad relativa y Presión Atmosférica) / Quad Serial Peripheral Interface (QSPI) que envían los datos al MIU. Los rangos de funcionamiento son para los sensores de temperatura entre -40 y 60 °C, humedad de entre 0 y 100% y presión atmosférica entre 750 y 1150 milibares. El anemómetro puede registrar cualquier velocidad desde 0 nudos y la dirección entre 0 y 360°. Estos datos relativos se corrigen, integrando la velocidad del buque en el MIU que envía los datos relativos y reales tanto a la estación de trabajo en el ordenador de la estación meteorológica como al sistema integrado de control de datos del buque. Los sensores se encuentran a 40 metros sobre el nivel del mar excepto el barómetro que se encuentra en el interior del buque conectado al exterior por el costado del buque por debajo del palo como se ve en el esquema de la figura 3.26.

#### 3.6.3. Datos de consumo de combustible

Una de las partidas en las que se puede hacer eficiencia de forma más directa y rápida es en el consumo de combustible así, cualquier medida que tomemos encaminada a su reducción debe ser meditada para no mermar las capacidades del buque y así su eficacia.

El buque objeto de estudio lleva instalada una planta de tipo CODOG para su propulsión que emplea dos motores diésel y dos turbinas de gas descritas en la sección 3.2 y que se agrupan de forma combinada en dos cámaras de máquinas separadas; estas son las encargadas de mover dos hélices acopladas por ejes y engranajes de reducción a estos motores.

La generación va segregada de la propulsión y corre a cargo de cuatro motores con las características descritas en la misma sección 3.2 y agrupados dos a dos en sendas cámaras denominadas de diésel generadores.

Los consumos correspondientes a cada uno de los equipos han sido discriminados

empleando los valores de consumo diario, puesto que al no disponer de caudalímetros instalados en los sistemas no se puede conocer el consumo instantáneo de los motores así, con los datos extraídos de los estadillos del buque de consumo de propulsión, los datos de fabricante y las curvas de potencia hemos calculado los consumos horarios para cada uno de los viajes.

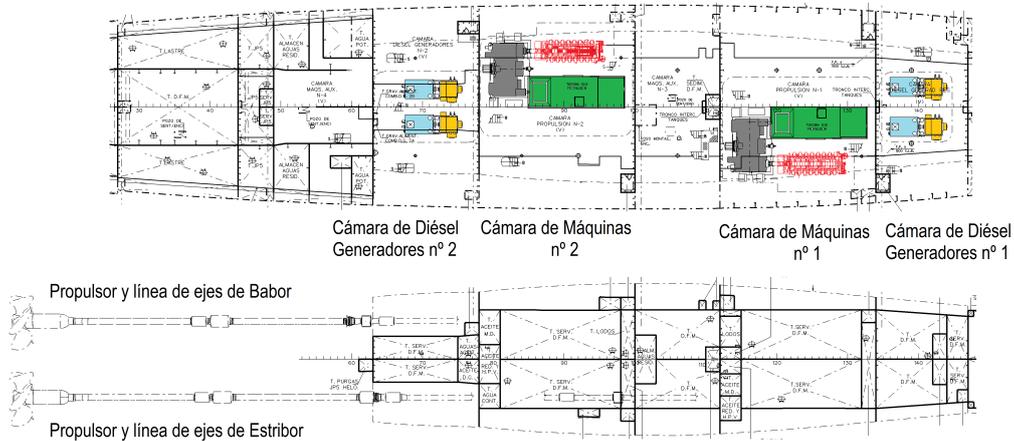


Figura 3.27: Ubicación espacios de máquinas. Elaboración propia (2017)

La figura 3.27 muestra un esquema de la disposición de los motores del buque y las cámaras que los albergan. Podemos ver que se concentran en dos zonas concretas del buque. Estos sistemas, además de ser también parte de los espacios más grandes del buque, son los consumidores de combustible más importantes del mismo. En color azul podemos ver los motores diésel generadores acoplados a sus alternadores en amarillo, el color verde vemos el encapsulado de las turbinas y en rojo los motores diésel de propulsión; en gris los engranajes reductores que acoplan la línea de ejes y su propulsor de Babor a los motores de la cámara de máquinas nº 2 y la línea de ejes y su propulsor de Estribor, a la cámara de máquinas nº 1. Para ver la posición relativa de estos espacios en el buque, podemos recurrir a la figura 3.9. El control de la temperatura ambiental de estos locales se hace por medio de termopares situados en cada cámara de máquinas en parejas, instalados equidistantes en altura dentro del local. Por debajo en el denominado doble fondo, es donde se disponen los tanques de combustible del buque y de fluidos necesarios para su funcionamiento como el aceite de lubricación como ya se explicó en el capítulo 2. El combustible empleado en la propulsión y en la generación eléctrica es el fuel OTAN F-76 cuyas características están reflejadas en estándares militares [197].

### 3.7. Características de las bases de datos

En esta tesis hemos generado bases de datos para cada uno de los viajes que hemos analizado en las que hemos recopilado y ordenado los datos correspondientes de forma contextualizada para su posterior análisis.

Las bases de datos obtenidas almacenan información cuantitativa de las variables y

otra información cualitativa como son los modos de operación o situaciones especiales, como ejercicios de lanzamiento de misiles en zafarrancho de combate.

Los datos brutos incluidos en estas bases de datos han sido obtenidos en su mayoría desde el SICP del buque objeto de análisis y se han completado con toma directa en local en algunos equipos o, monitorizados por el primero incluyendo toma de datos de documentos no integrados con el SICP.

La creación de estas bases de datos busca fundamentalmente servir de elemento de análisis de correlación entre las variables y control estadístico de los procesos. Todo ello nos ha llevado a comprobar una vez construidas su integridad validez y consistencia.

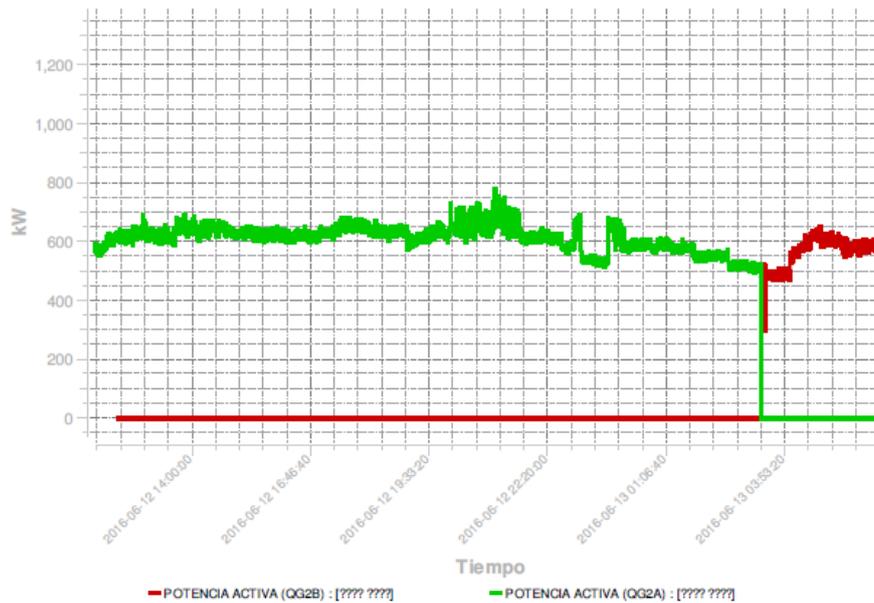


Figura 3.28: Ejemplo de gráfico de datos. Elaboración propia (2018)

Al ser una base de datos con información procedente de un buque de guerra, se ha limitado el acceso a la misma manteniendo esta controlada de forma constante en un soporte informático aislado de posibilidades de acceso desde Internet u otro tipo de redes para garantizar así, su inviolabilidad.

Lo anterior ha facilitado la imposibilidad de concurrencia en el uso de la base de datos por distintos usuarios a un mismo tiempo que pudiesen poner en riesgo la integridad de las mismas además, de la posibilidad de pérdida parcial de información.

Para garantizar su recuperación se ha realizado una copia de seguridad que se actualizaba cada vez que se volcaban datos en la misma o se añadían nuevas variables a esta base de datos.

Antes de construir estas procedimos a elaborar un diseño de las mismas, basándonos en la documentación que nos ha permitido ver los registros, editarlos, limitar su accesibilidad, revisar y comentar los mismos [198], [199], [200], [201].

Fundamentalmente hemos obtenido los datos de las bases elaboradas en el SICP de donde hemos descargado ficheros en formato \*.html para obtener datos tabulados y también formato \*.pdf para obtener gráficos de las variables como el que

podemos ver en la figura 3.28; en el primero de los casos hemos creado directamente fichero \*.csv y en los segundos hemos tratado los mismos con un programa libre denominado “Engauge Digitazer” [202] el cual permite mediante un proceso de importación de ficheros en \*.pdf obtener ficheros \*.csv mediante un proceso de digitalización en formato \*.dig de las imágenes en formatos \*.pdf, \*.jpeg ó \*.tiff mediante la definición de los ejes coordenados, su escala y que podemos ver en la figura 3.29 [203].

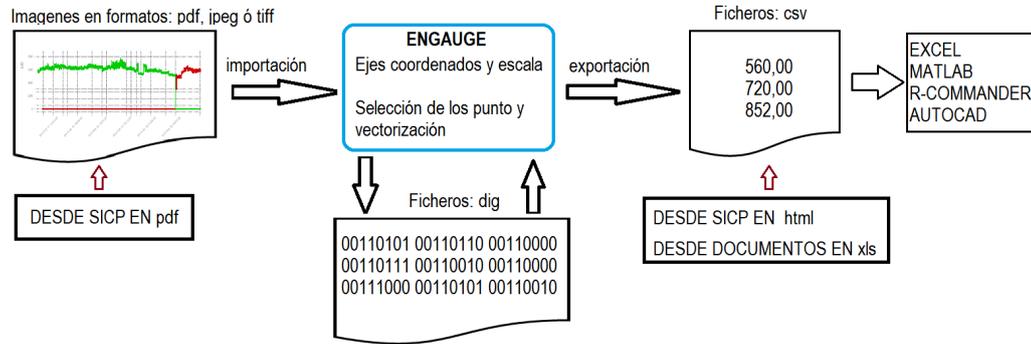


Figura 3.29: Proceso de digitalización. Elaboración propia (2018)

La obtención de los ficheros \*.csv nos permitió compilar los mismos en una base de datos brutos para ser tratados con distinto software comercial como hojas de cálculo en Excel, R-commander, MATLAB o AUTOCAD como podemos ver en la figura esquemática 3.29.

### 3.7.1. Dimensiones de las matrices de datos

En este punto vamos a dar de forma sucinta una descripción de las matrices de datos elaboradas en el desarrollo de esta investigación. Como ya hemos comentado antes hemos considerado para el estudio 5 viajes que se pueden subdividir en distintas etapas con relación a su posición sobre el Globo y su modo de funcionamiento. De forma global se han considerado en cada caso las tomas de tiempos a nivel horario para los viajes 1, 3 y 4 y, un intervalo de 20 minutos en el caso del viaje 2 de Cádiz a Ferrol. En este último caso se decidió acortar el tiempo de toma para poder ampliar el número de lecturas por ser el viaje más corto de todos así, las matrices de datos obtenidas, representan lecturas con respecto al tiempo  $t$  como podemos ver en el cuadro 3.11 con un total de 59.273 valores. Todos estos datos serán de aplicación en los cálculos de los distintos elementos presentados y analizados en el capítulo 4 y que servirán para elaborar las conclusiones finales de esta tesis.

Todos estos valores se han distribuido entre los distintos modos de operación que hemos designado en nuestras tablas de datos como:

- F. : para el modo de fondeado.
- P.A.: para el modo de puerto apagado cuando recibía el buque su energía de la red eléctrica terrestre.
- P.E.: para el modo de puerto encendido cuando, estando en puerto, este empleaba sus propios medios para general electricidad.

nº	viaje	Intervalo	Variables	datos	Total
1	V. Ferrol	1 h.	7	192	1.344
2	V. Cádiz	20 min.	14	145	2.030
3	V. EE.UU.	1 h.	24	1.221	29.304
4	V. Australia	1 h.	27	985	26.595

Cuadro 3.11: Número de mediciones. Elaboración propia (2018)

- C.R.: para el modo de crucero en los desplazamientos de un punto a otro del Globo.
- O. : para el modo de operación en que el buque desarrolla ejercicios de distinta entidad.
- P.A.N.: para los días en los que el buque se encuentra en puerto apagado recibiendo la corriente de la red eléctrica terrestre y navegando en otros momentos del mismo día. Se empleará como los dos siguientes exclusivamente para las tablas de consumos de combustibles elaboradas para calcular firmas de huella de carbono e índices EEOI. Es el acrónimo de Puerto Apagado y Navegando.
- P.E.N.: para datos en los días que se entremezclaba periodos en puerto y navegando. Este acrónimo responde al texto Puerto Encendido y Navegando. Se ha empleado fundamentalmente para las tablas de consumos de combustibles que se establecen de forma diaria como hemos dicho con anterioridad.
- N.: en las tablas de consumos se ha tomado este acrónimo de Navegando para los días que el buque se encuentra navegando las 24 horas del día. Bajo este se agrupan todos los datos de consumo del buque C.R., O.

Como se puede ver, estas no coinciden exactamente con los modos que se establecen para el diseño de los buques de guerra como hemos explicado en el capítulo anterior (véase sección 2.4.4). De igual forma para los datos de consumo, además de los reflejados en la toma de datos de los viajes 3 y 4 se han considerado los valores de consumos por días <sup>4</sup>, abarcando un periodo que va desde finales de 2012 hasta finalizar el viaje en Australia en 2017. Esta matriz de datos de consumos nos permitirá efectuar un análisis de índices EEOI y establecer relaciones de consumo en situaciones de puerto y navegando.

### 3.8. Desglose de las STD

El estudio de las STD de los distintos viajes sobre las variables representadas en el cuadro 3.10 es importante para conocer la realidad del consumo energético a bordo del buque. Este análisis os permitirá localizar las variables de influencia que permitan elaborar procesos más eficientes sobre las bases de los modos de operación arriba indicados.

<sup>4</sup>Los datos correspondientes a estas variables están recogidos en ficheros que han permitido la integración de los datos. Estos ficheros han sido elaborados en su mayoría con procesadores de hoja de cálculo comerciales. Las bases de datos no están incluidas en la tesis obrando en poder del autor por cuestiones de confidencialidad.

De forma general para el análisis posterior desglosaremos los distintos viajes en etapas de modos de navegación para el análisis de correlaciones y aplicación de los gráficos de control. Debido a que no hemos podido disponer de los datos de consumo real de combustible del buque para el primero de los viajes analizados, el cálculo del EEOI lo efectuaremos sobre una matriz de datos que abarca desde enero de 2013 hasta el fin del viaje a Australia en 2017 y consideraremos estos viajes desglosados.

#### **3.8.1. Datos del viaje de pruebas en Ferrol**

Periodo de pruebas final de garantía del buque en aguas costeras de Galicia efectuado antes de su entrega definitiva a la Armada y que ha servido como elemento inicial de análisis para establecer las hipótesis. Este periodo lo podemos dividir en distintos periodos por los modos de funcionamiento del buque en los siguientes:

1. Periodo de puerto apagado.
2. Periodo de operación.
3. Periodo de fondeo.
4. Periodo de crucero.
5. Periodo de puerto encendido.
6. Periodo de puerto apagado.
7. Periodo de crucero.
8. Periodo de puerto encendido.
9. Periodo de puerto apagado.

Hay que destacar que estos periodos son cortos y de información sesgada por su antigüedad y por haber sido tomados de datos no automatizados como han sido los otros y sin intervención en su preparación por nuestra parte, de todas formas nos permitieron elaborar las hipótesis y una primera aproximación al problema planteado en esta tesis doctoral.

#### **Consumo de combustible**

De este viaje no disponemos de datos de consumo por lo que no se empleará para el cálculo del EEOI.

#### **3.8.2. Datos del viaje de Cádiz a Ferrol**

Tránsito desde Cádiz a Ferrol efectuado durante el periodo de garantía del buque. El periodo de garantía tiene una duración de un año de forma general para el buque y sus sistemas y en el mismo el buque no puede desplegarse en operaciones fuera de aguas nacionales. Los periodos que podemos distinguir en este viaje son:

1. Periodo de puerto encendido.

2. Periodo de operación.
3. Periodo de crucero.
4. Periodo de puerto encendido.
5. Periodo de puerto apagado.

Este tránsito es el primero del que tenemos datos de forma controlada por nosotros, elaborando tablas de datos más completas que permitieron avanzar en la toma de decisiones para el análisis de las series de datos posteriores. La matriz de datos es corta, pero para determinar correlaciones e índice EEOI es un dato válido.

#### **Consumo de combustible**

En este viaje el consumo de combustible se desglosa en dos partidas, una dedicada a la generación y otra dedicada a la propulsión pero se dieron de forma global por día. Toda la generación eléctrica en kW está desglosada por motores nombrados como 1A, 1B, 2A y 2B y de los que podemos ver sus posiciones en la figura 3.27.

#### **3.8.3. Datos del viaje a EE.UU.**

Este viaje supuso un hito de gran importancia puesto que sirvió para validar la capacidad de lanzamiento de misiles y determinar así la validez del buque para realizar de forma eficaz las misiones para la que fue creado. Dentro de este viaje podemos desglosar los datos en los periodos siguientes:

1. Periodo de crucero Ferrol Azores (Portugal).
2. Periodo de puerto encendido en isla de San Miguel (Azores).
3. Periodo de crucero o tránsito a Norfolk (EE.UU.).
4. Periodo de puerto apagado en Norfolk.
5. Periodo de operación en lanzamiento de misiles en aguas territoriales de EE.UU.
6. Periodo de puerto apagado en Norfolk.
7. Periodo de operación en lanzamiento de misiles en aguas de EE.UU y fin de ejercicios.
8. Periodo de estancia en puerto encendido fin de pruebas de lanzamiento.
9. Periodo de tránsito en crucero a Halifax (Canadá).
10. Periodo de estancia en puerto apagado en Halifax.
11. Periodo de tránsito a España y final.

Con este viaje se aumentaron de forma significativa el número de variables consideradas para el análisis de sus correlaciones.

#### **Consumo de combustible**

En este viaje el consumo de combustible se desglosa en dos partidas, una dedicada a la generación y otra dedicada a la propulsión. También se ha determinado el consumo horario del buque en la toma de datos en todas las condiciones que se produjeron durante el viaje.

#### **3.8.4. Datos del viaje a Australia**

Este viaje se produce en 2017 con motivo del apoyo de la Armada a la industria nacional y como prueba de la capacidad de despliegue de la armada en escenarios lejanos. Los periodos considerados en este viaje son los siguientes:

1. Periodo de crucero Ferrol-Estrecho de Gibraltar-Canal de Suez, Yedda (Arabia Saudí) 2017. Este supone la primera etapa de un viaje de circunnavegación del Globo enmarcando un despliegue en Australia.
2. Periodo de crucero Yedda a Bombay (India) como segunda etapa del viaje.
3. Periodo de crucero Bombay-Mumbai a Singapur (Singapur) es la tercera de las etapas.
4. Periodo de crucero que marca la última etapa oceánica del viaje de tránsito a Australia.
5. Periodo de operación y crucero en el que se encuadra la primera de las navegaciones de colaboración con la marina Australiana en 2017. Este periodo permitió analizar de forma más objetiva la condición fundamental para la que están creados los buques que no es otra que la de desplazarse, en modo de Crucero (C.R.).

#### **Consumo de combustible**

En este viaje el consumo de combustible se desglosa en dos partidas al igual que los anteriores, el cual está repartido en cinco etapas, como no disponemos de los periodos de puerto entre cada una de ellas, todos los datos de consumo se refieren al modo de crucero.

A modo de resumen, en la tabla 3.12 podemos ver reflejados los valores correspondientes a cada viaje, modo de funcionamiento, horas (h.) en el modo, consumo total de los DD.GG. para la generación eléctrica (C. Gen.), consumo de propulsión (C. Prop.) y millas recorridas en cada viaje (nm). Los datos se corresponden con los datos reales registrados durante los cuatro viajes.

Los consumos y las millas se dan en conjunto para cada viaje en la tabla 3.12 y hacemos una idea del volumen de combustible consumido y las millas recorridas, lo que nos permite hacer un cálculo aproximado que relacione el consumo del buque con la distancia con respecto al combustible empleado en la propulsión.

### 3.9. PREPARACIÓN Y ORDENACIÓN DE LOS DATOS

nº	Viaje	Modo	h.	C. Gen.	C. Prop.	nm
1	V. Ferrol	F. P.A. P.E. O. C.R.	11 36 85 14 46	-	-	n.d
2	V. Cádiz	F. P.A. P.E. O. C.R.	0 0 10,5 6 31,5	13.135	56.226	649
3	V. EE.UU.	F. P.A. P.E. O. C.R.	3 504 117 39 558	188.390	944.235	7.597
4	V. Australia	F. P.A. P.E. O. C.R.	0 8 8 0 968	306.044	1.295.912	13.728

Cuadro 3.12: Modos, duración, consumo y millas. Elaboración propia (2019)

### 3.9. Preparación y ordenación de los datos

Una vez tomados los datos se ha procedido a elaborar una matriz por cada viaje en el cual se volcaron los valores de las distintas variables consideradas en cada uno de los viajes. De forma esquemática responden a una estructura de variables como se ve en la figura 3.30. las variables se pueden agrupar en variables de generación y consumo, variables ambientales interiores, variables climáticas exteriores y variables del buque. Todas ellas referidas al tiempo  $t$ . Las podemos ver descritas en el cuadro 3.10.

VIAJE 4: TRANSITO AUSTRALIA																																					
Fecha	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	PHVAC	C <sub>00</sub>	C <sub>01</sub>	V <sub>01</sub>	V <sub>02</sub>	R <sub>01</sub>	S	HR	T <sub>amb-pp</sub>	T <sub>amb-pr</sub>	T <sub>amb</sub>	T <sub>a</sub>	V <sub>NAV</sub>	V <sub>EV</sub>	D <sub>NAV</sub>	D <sub>EV</sub>	T <sub>A001</sub>	T <sub>A002</sub>	T <sub>A003</sub>	T <sub>A004</sub>	T <sub>001</sub>	T <sub>002</sub>	T <sub>003</sub>	T <sub>004</sub>	T <sub>005</sub>	T <sub>006</sub>	T <sub>007</sub>	T <sub>008</sub>	T <sub>009</sub>	T <sub>010</sub>	Modo	
1	9-1-17 12:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,10	0,00	91,09	0,00	80				13,00	7,50	0,5	24,2	266,6					17,29	14,89	15,60	22,79	27,89	22,89	17,39					P.A.
2	9-1-17 13:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,10	0,00	30,20	0,00	79				13,00	7,00	2,59	48,4	261,79					17,20	14,60	15,50	22,89	27,79	22,89	17,60					P.A.
3	9-1-17 14:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,10	0,00	233,39	0,00	77				13,00	6,80	1,1	119,9	202,6					17,00	14,69	15,50	22,70	27,70	23,1	17,60					P.A.
4	9-1-17 15:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,00	0,00	234,89	0,00	78				13,00	6,40	3,2	10,1	225,6					16,70	14,50	15,39	23,39	27,60	22,89	17,39					P.A.
5	9-1-17 16:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,00	0,00	31,60	0,00	77				13,00	6,09	2,09	4	215,39					16,60	14,19	15,39	23,39	27,60	22,89	17,20					P.A.
6	9-1-17 17:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,00	0,00	245,39	0,00	76				13,00	6,19	0,6	86,4	280,39					16,50	14,39	15,39	22,79	27,70	23	17,50					P.A.
7	9-1-17 18:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00	77				13,00	6,09	0,69	46,9	126,69					16,39	14,39	15,39	23,10	27,89	23,1	18,00					P.A.
8	9-1-17 19:00	0,00	0,00	0,00	0,00		NA	0,00	0,00	0,00	264,10	0,00	78				13,00	5,90	0,4	204,69	54,2					16,29	13,89	15,30	27,39	28,79	23,29	18,00					P.A.
9	9-1-17 20:00	0,00	0,00	312,00	312,00		88,61	0,00	0,00	0,00	197,69	0,00	78				13,00	6,40	2,79	342,7	192,19					16,29	14,10	15,60	26,20	29,29	23,39	18,39					P.E.
10	9-1-17 21:00	0,00	0,00	476,00	0,00	476,00	135,18	9,80	0,10	0,50	131,30	0,50	79				13,00	8,60	2,29	90,9	313,89					16,79	14,30	15,50	26,60	30,50	24	18,60					C.R.
11	9-1-17 22:00	0,00	386,00	577,00	0,00	963,00	273,49	980,00	10,00	9,89	234,30	10,05	69				14,00	10,39	7,09	104,8	315,89					23,00	14,39	15,69	22,00	29,39	20,89	16,79					C.R.
12	9-1-17 23:00	0,00	586,00	589,00	0,00	1175,00	333,70	1537,62	15,69	15,10	270,50	15,50	63				15,00	12,39	2,7	245,1	356,89					26,20	15,10	16,39	20,79	29,60	21,7	19,00					C.R.
13	10-1-17 0:00	0,00	581,00	572,00	533,00	1686,00	478,82	1488,62	15,19	16,10	240,39	15,85	65				15,00	13,60	0,89	252,1	0,8					26,50	16,20	16,89	20,39	30,29	22,7	20,70					C.R.
14	10-1-17 1:00	0,00	293,00	521,00	510,00	1324,00	376,02	1508,22	15,39	15,19	241,00	15,49	72				15,00	14,00	5,8	314,39	18,1					28,60	16,79	17,50	20,00	30,50	23,39	21,39					C.R.
15	10-1-17 2:00	0,00	460,00	539,00	502,00	1501,00	426,28	1499,40	15,30	15,10	192,60	15,40	68				15,00	14,60	2,5	359,79	4,3					29,20	17,29	18,00	19,70	30,60	23,7	22,00					C.R.

Figura 3.30: Hojas de variables. Elaboración propia (2019)

Las tablas así generadas han sido la base sobre la que se aplicaron las herramientas estadísticas descriptivas y de inferencia y, han servido de base para los cálculos de EEOI y otras operaciones realizadas en el capítulo 4 de análisis.

De igual forma se han recopilado datos de carácter cualitativo que sirvan de aplicación en el análisis de los datos cuantitativos como horarios de actividad de trabajo o descansos en los distintos modos de operación del buque. Estos elementos son importante también en los estudios cuantitativos y por tanto en el análisis de la EE de buques de guerra en particular y de cualquier sistema energético en general.

Puede parecer difícil o imposible la aplicación de la investigación cualitativa en ingeniería y generalmente se suele olvidar el análisis cualitativo y esto es un concepto erróneo. Referiremos lo que dicen Cárcel y Roldán [204] que muy bien podemos aplicar a investigaciones como la de esta tesis doctoral respecto de las variables de tipo cualitativo:

*“Dentro de la actividad del mantenimiento industrial, la medición y cuantificación de las diferentes variables físicas es vital para marcar el estado operativo y el servicio prestado. Todo esto se realiza mediante técnicas de investigación cuantitativas y se olvidan otros aspectos que influyen de una manera importante en el servicio (el propio personal), cuya manera adecuada de medición, en numerosos casos solo es posible investigar mediante técnicas cualitativas”.*

Sus afirmaciones son evidentes, los entornos en los que trabajan las personas necesitan de este tipo de estudios para poder, como en esta tesis, unir elementos que de otra forma no se podrían tener presentes y que, además son una inestimable ayuda a la hora de interpretar los datos y para hacer inferencias sobre los resultados.

Combinar el análisis cuantitativo con el cualitativo mediante el empleo de entrevistas a usuarios del sistema estudiado, conociendo los niveles de preparación o el ambiente de trabajo, los cuales son elementos difícilmente cuantificables, favorece el análisis final del estudio y sus conclusiones. En definitiva, es importante aplicar a la parte del estudio de carácter cuantitativo las máximas de: observar, preguntar y leer sin marcarse objetivos o hipótesis iniciales [205].

### 3.10. Validación de los datos

La validación de los datos nos permite asegurar que los datos empleados son claros, precisos y consistentes a la hora de realizar la MD. Podemos asegurar el cumplimiento de los parámetros de calidad y control requeridos en el proceso de análisis posterior. La validación de los datos empleados se demuestra en:

1. **Rango:** los datos están dentro de los límites superiores e inferiores definidos para el proceso dentro del rango marcado para cada uno de los viajes. Es decir, abarcan periodos suficientemente largos y acumulan datos suficientemente completos para ser analizados e interpretados con el objeto de hacer inferencia desde los mismos.
2. **Tipo:** datos tomados coinciden en cada muestra con los valores esperados para cada una de las variables analizadas. es decir los datos de temperaturas son de temperaturas y los datos de humedades son de humedades por poner un ejemplo.

3. **Longitud:** los datos se ajustan a las longitudes establecidas por las características de las variables o las restricciones de puntos decimales que hemos marcado para cada una de ellas, de igual forma se han comprobado los requisitos de normalización adimensional que se establecieron en cada uno de los viajes.
4. **Formato:** las tomas de datos se han hecho de igual forma siguiendo los mismos criterios en todo momento. No existen errores de escritura en las bases de datos que puedan alterar los resultados obtenidos en el análisis de los mismos.
5. **Presencia:** en aquellos campos en los que se ha podido perder su información, han quedado fuera del estudio para evitar falsear los resultados finales, esto no ha sucedido de forma frecuente pero si se han detectado algunas informaciones sesgadas que se han descartado en el análisis.

Haremos aquí especial referencia al criterio que la International Energy Agency (IEA) [206] da sobre la validación de los datos empleados en análisis estadístico de indicadores energéticos. Esta asociación determina cuatro parámetros para la validación:

1. **Cobertura y definiciones:** buscamos garantizar que los datos recopilados cumplen los requisitos predefinidos en términos de variable, sistemas, tiempo y cualquier otra característica considerada.
2. **Congruencia interna:** buscamos mantener las relaciones previstas entre los diversos elementos de la matriz de datos. Por ejemplo la reproducción respecto del tiempo, o la constancia de las relaciones.
3. **Coherencia con las fuentes externas:** así se asegura que los datos mantienen congruencia con datos presentados por otras fuentes tanto en sus valores, como rangos, como análisis.
4. **Plausibilidad:** que básicamente se establece mediante controles de verosimilitud que garantizan que los resultados obtenidos están dentro del rango esperado, es decir, que por ejemplo no salen valores negativos en la toma de datos de consumos de un motor propulsor.

Esta validación establece etapas similares a las que hemos realizado nosotros en cinco pasos. Todos los datos recopilados en esta investigación han sido preparados para su análisis empleando hojas de calculo que han permitido su integración y se han separado por viajes para ofrecen información sobre consumos, modos de operación y otros elementos de carácter tanto cuantitativo como cualitativo <sup>5</sup>.

## 3.11. Conclusiones del capítulo

En este capítulo hemos procedido a particularizar para nuestro estudio los elementos descritos en el capítulo dos de estado del arte para el buque objeto de estudio. La plataforma analizada es una de las más modernas en su tipo que existen y tiene similares características a las que prestan servicio en otras marinas de guerra

---

<sup>5</sup>Las bases de datos elaboradas para esta tesis no se encuentran disponibles por cuestiones de confidencialidad.

de nuestro entorno como la noruega, australiana o la de los EE.UU.

El diseño del buque requiere de elementos que permitan determinar los consumos energéticos por lo que, es necesario determinar de forma clara los sistemas embarcados dada la elevada demanda energética de los mismos para su funcionamiento.

El buque seleccionado separa sus consumos en dos categorías, el consumo de combustible dedicado a la propulsión del buque y el consumo de combustible dedicado a la producción de energía para alimentar los sistemas embarcados.

Con respecto a los sistemas, los sistemas de mando y control o las armas no son los más demandantes, siendo los sistemas auxiliares los que tienen mayor peso en el consumo en todos los modos de funcionamiento ya que, debido a la gran cantidad de funcionalidades que se le pide a un buque de guerra, los sistemas auxiliares son los más abundantes.

Dentro de la familia de sistemas auxiliares, se encuentra el sistema HVAC el cual es el más demandante de todos ellos en la práctica totalidad de los modos de operación en base a los cálculos iniciales, pues su factor de utilización es alto ya que se encuentra funcionando constantemente.

Hemos visto que los buques de guerra se diseñan tradicionalmente desde un punto de vista estático, considerando valores máximos y mínimos para las temperaturas, dividiendo los modos en dos estaciones denominadas “verano” e “invierno” unido a una serie de modos de operación en los que los distintos consumidores se evalúan mediante unos coeficientes de uso en el intervalo (0-1) pero en ningún momento se analizan desde un punto de vista dinámico.

Esto nos ha orientado a efectuar un selección y análisis de datos de variables que puedan influir en el consumo para determinar cual puede ser su relación con el consumo del buque tanto para la generación eléctrica como para la propulsión.

Se han elaborado matrices de datos para las variables respecto del tiempo las cuales, se han ido haciendo más grandes a medida que avanzaba el estudio para poder establecer fundamentos firmes de relación entre ellas, además de comprobar la necesidad de establecer cierto análisis de variables de tipo cualitativo que puedan complementar en análisis cuantitativo de esta tesis.

Todos los datos recogidos se han integrado en matrices temporales teniendo presentes los modos de operación del buque, y las variables consideradas como pueden ser las condiciones ambientales tanto exteriores como interiores, los consumos o las demandas energéticas del sistema buque.

# Capítulo 4

## Análisis de los datos

En este capítulo aplicaremos distintas herramientas estadísticas al análisis de los datos recogidos de las variables seleccionadas y obtenidos en el trabajo de campo. Las variables seleccionadas, el estudio de las series STD y la aplicación de las técnicas de análisis y los modelos elaborados forman el grueso de este capítulo.

Se aplicarán elementos estadísticos descriptivos que nos permitan efectuar inferencias o predicciones sobre el sistema buque. Las distintas herramientas se han descrito en el capítulo de estado del arte.

Las variables analizadas en cada uno de los viajes, expuestas en el cuadro de variables por viajes del capítulo 3, permitirán descubrir las causas fundamentales asignables a la mayor o menor EE del buque así, podremos asegurar las conclusiones correctas que nos permitan favorecer la toma de medidas que potencien la EE.

### 4.1. Análisis del balance energético de diseño

En las figuras 4.1 y 4.2 podemos ver representados los valores de cálculo de balance eléctrico para el buque objeto de análisis. En ellos se muestran en primer lugar los valores totales de consumidores por grupos de coste (200 a 700) y a continuación los valores de consumo sobre la base de la estación climática y el modo de operación (subsección 2.4.5) considerados para el diseño que, podemos comparar con los resultados obtenidos en los distintos viajes.

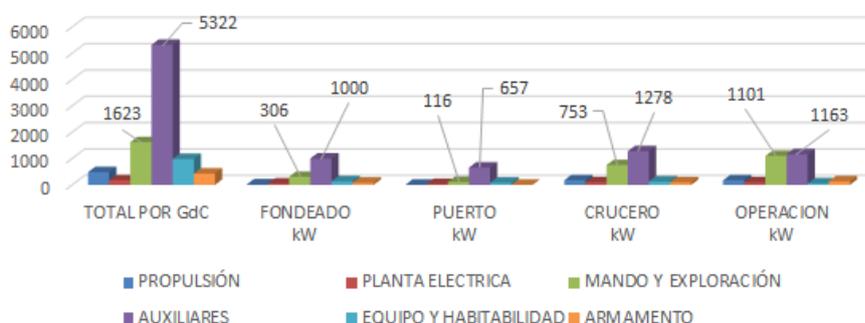


Figura 4.1: Consumos modos en verano. Elaboración propia (2019)

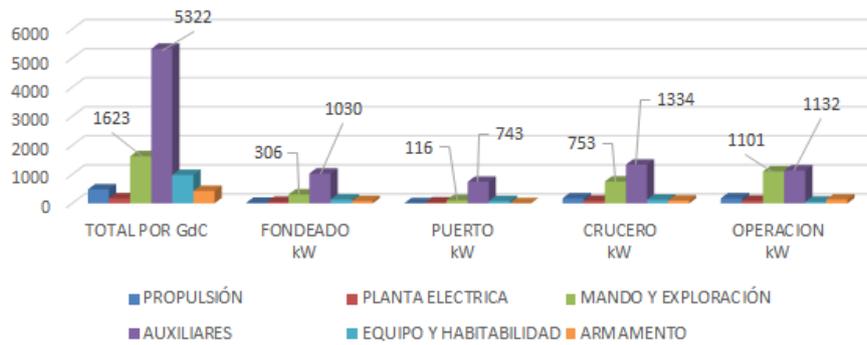


Figura 4.2: Consumos modos en invierno. Elaboración propia (2019)

A la vista de los cálculos establecidos para cada modo de funcionamiento vemos que, tanto en invierno como en verano, son los equipos auxiliares los que tienen más carga en todas las condiciones que se contempla entre 657 kW de puerto verano y 1.334 kW de la condición de crucero en invierno.

La variabilidad en consumos es mayor en el grupo de mando y exploración (400) donde el consumo aumenta de forma considerable en las condiciones de crucero y de operación del buque oscilando de los 116 kW en la condición de puerto, a los 1.101 kW de la condición de operación verano o invierno indistintamente.

Hemos dejado de analizar las situaciones de emergencia pues en estas situaciones no son las habituales y, por otro lado, los esfuerzos en este modo van encaminados a mantener el buque a flote para salvarlo junto a su dotación al margen de consideraciones de consumo energético.

Comparativamente con los totales determinados para cada grupo de coste vemos que la gran diferencia entre totales y carga considerada para cada modo, lo que muestra el nivel de redundancia y seguridades que se consideran para el cálculo de los balances eléctricos del buque.

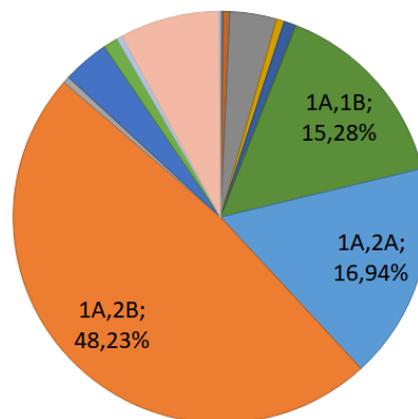


Figura 4.3: Combinaciones viaje a Australia. Elaboración propia (2019)

En cada condición se indica cuantos DD.GG. deben estar en funcionamiento lo que podemos ver en el cuadro 3.2. Esto no casa del todo con la realidad de los datos obtenidos para nuestro análisis pues, en general, en ninguno de los modos analizados en el buque se cumple este criterio de diseño de la planta de generación.

Los datos reales del buque muestran que generalmente se funciona con dos diésel generadores. Como vemos en los datos de los viajes 2, 3 y 4 (Cádiz, EE.UU. y Australia) y, como se puede ver en el cuadro 4.1 el número de horas de las distintas condiciones en las que se consideran tres DD.GG. es mínimo.

Si nos fijamos en el cuadro 4.1 podemos ver que como de las horas de funcionamiento de la planta (h.f.), la condición en la que se encuentran funcionando dos motores es la más habitual. En el viaje 2, 3 y 4 representa, respectivamente, el 85%, 80,5% y 84,6% del tiempo total. Teniendo presente que los tres viajes son muy distintos entre si, y distantes en el tiempo, podemos afirmar que como norma general el buque trabaja con dos diésel y no sigue los criterios de diseño que marca 3 diésel generadores en funcionamiento para la mayoría de las condiciones.

nº	Viaje	Generador	h.	Nº DD.GG.	h.f.
2	V. Cádiz	1A	0	1	0
		1B	40	2	41
		2A	18	3	7
		2B	47	4	0
3	V. EE.UU.	1A	562	1	52
		1B	294	2	550
		2A	478	3	75
		2B	61	4	6
4	V. Australia	1A	833	1	91
		1B	178	2	814
		2A	329	3	55
		2B	552	4	2

Cuadro 4.1: Horas por diésel y número de DD.GG. Elaboración propia (2019)

Atendiendo a los datos de los viajes mencionados, empezaremos del más reciente al más antiguo y así, el viaje a Australia, representados en la figura 4.3, solo tres combinaciones de motores (1A-1B), (1A-2B) y (1A-2A) asumen el trabajo en el 80% de las horas de trabajo de la planta y en proporciones muy dispares, ya que la combinación (1A-2B) asume el 48,23% del tiempo total.

De igual forma si analizamos los datos del viaje a EE.UU. la combinación más habitual es dos diésel encendidos representando en su conjunto el 81,72% como vemos en la figura 4.4. Las combinaciones (1A-1B), (1A-2A) y (1B -2A) asumen la generación el 78% del tiempo de funcionamiento de la planta. La combinación (1A-2A) en este caso asumen más de la mitad del trabajo de la planta en este viaje con el 51% del tiempo total.

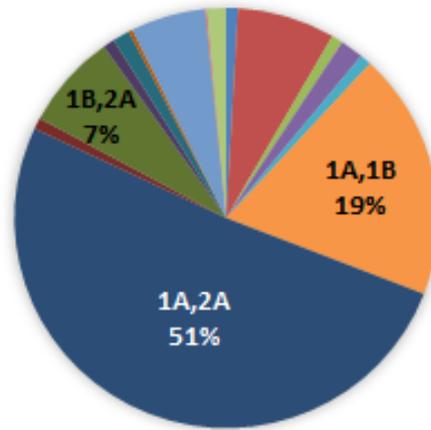


Figura 4.4: Combinaciones viaje a EE.UU. Elaboración propia (2019)

En el viaje de Cádiz (figura 4.5) la combinación de dos motores cubre el 85% de tiempo total del funcionamiento de la planta. Como en los casos anteriores, es dispar el uso de una u otra combinación y, en este viaje, las combinaciones que se presentaron fueron (1B-2B) y (2A-2B) cubriendo la primera de ellas el 65% del trabajo. En este viaje también se presenta una combinación de tres motores en proporción similar a la combinación (2A-2B) con un 16% aunque, debemos tener presente, que por la tendencia de todos los datos analizados las combinaciones de tres motores no son lo más frecuente.

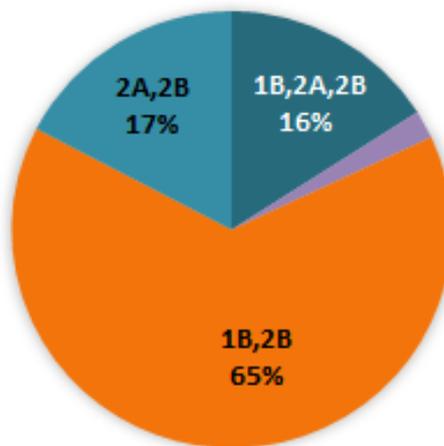


Figura 4.5: Combinaciones viaje de Cádiz . Elaboración propia (2019)

Podemos comprobar a la vista de este primer análisis, que no se cumplen en el funcionamiento las premisas determinadas en el diseño y cálculo de las SCE y que, tampoco son constantes las combinaciones de dos motores dependiendo de un elemento aleatorio no controlable el funcionamiento con uno u otro motor, así pues

tenemos que considerar que el empleo de la planta no se hace en modo automático y depende más de las decisiones del personal que opera estos sistemas.

### 4.2. Análisis gráfico de los datos

En esta sección vamos a tratar la información de cada uno de los cuatro paquetes de datos recopilados de forma gráfica. Los gráficos son una herramienta fundamental para obtener una visualización de las tendencias de las variables y de posibles correlaciones.

Las representaciones gráficas que veremos en las distintas subsecciones emplean datos adimensionales debido a la necesidad de emplear un escalado que permita representar las mismas sin perder su sentido en gráficos de recorrido respecto del tiempo ( $t$ ). Esto se debe a la diferencia existente en el valor numérico de variables como las de potencia (en miles), de consumo (cientos) o de temperatura (decenas). Por ello para poder tener una visión de conjunto fue necesario recurrir a valores adimensionales que, por otro lado, no desvirtúan en ningún caso la realidad de los datos.

El análisis gráfico nos permitió también conocer agrupamientos, aleatoriedad, tendencias o proporcionalidades que existentes entre las distintas variables representadas en base a estos gráficos de recorrido.

#### 4.2.1. Análisis gráfico del viaje de prueba en Ferrol

En la figura 4.6 podemos ver representadas las variables analizadas en la fase inicial de este trabajo. Estas variables las podemos ver identificadas en la parte de derecha. Se observa que la variabilidad de los procesos es grande a excepción de la variable de temperatura del VLS  $T_{VLS}$ , la cual no manifiesta prácticamente variaciones a lo largo del tiempo y, algo similar sucede con la temperatura de la cámara de diésel generadores n°2  $T_{DG2}$ .

Esto nos ha llevado a descartar, en primer lugar, la temperatura del VLS por ser perfectamente predecible y no verse afectada por las variaciones del resto de variables, su temperatura es prácticamente invariable, por lo que no se ve afectada por los procesos energéticos del buque. Por otro lado el comportamiento de la temperatura del local de generadores, muestras su variabilidad de forma clara y, en los momentos en los que arranca este vemos que sube la temperatura del local y bajando cuando entra en funcionamiento la ventilación de la cámara por ello en este local la temperatura la variabilidad de la temperatura va ligada a el modo encendido/apagado del motor.

Hemos reflejado en el gráfico de este viaje n° 1, los periodos mantenidos en las distintas condiciones ya referidos en la subsección 3.8 que son:

1. Periodo de puerto apagado. (I)
2. Periodo de operación. (II)
3. Periodo de fondeo. (III)
4. Periodo de crucero. (IV)
5. Periodo de puerto encendido. (V)

6. Periodo de puerto apagado. (VI)
7. Periodo de crucero. (VII)
8. Periodo de puerto encendido. (VIII)
9. Periodo de puerto apagado. (IX)

Para el resto de viajes haremos referencia a las etapas descritas en la sección 3.8 si no se indica lo contrario.

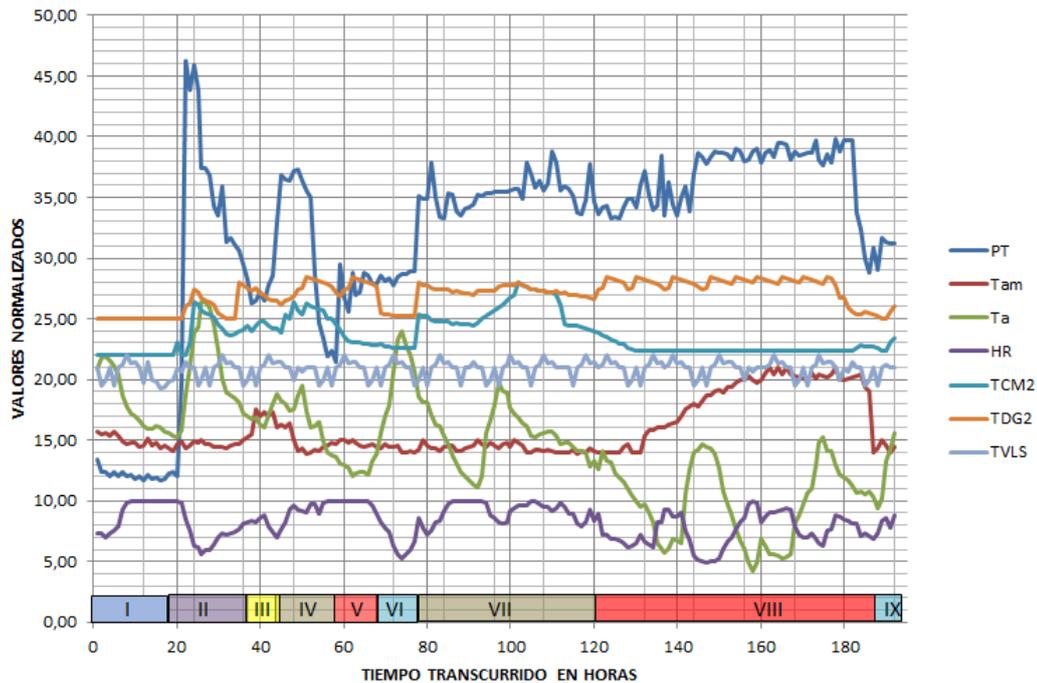


Figura 4.6: Variables del viaje nº 1 de prueba (Ferrol). Elaboración propia (2019)

En la figura 4.7 hemos eliminado la representación de las variables correspondientes a las temperaturas de la cámara de diésel generadores (TDG 2) y al local del lanzador vertical (VLS) para mayor claridad. En la figura encontramos cuatro áreas que nos han llamado la atención a la hora de efectuar este análisis gráfico numeradas del 1 al 4 y enmarcadas en verde.

Tomando la gráfica de consumo eléctrico *PT* aislado, y marcando de forma gráfica las condiciones de funcionamiento (periodos en números romanos), podemos ver que este consumo es más bajo en las situaciones de puerto apagado (P.A) y más elevado en las condiciones de operación (O.), fondeado (F.) y puerto encendido (P.E.). La distribución de los periodos de cada condición se puede seguir según el código de colores representado a la derecha del gráfico correspondiente 4.7.

Se ha marcado en azul celeste los periodos de Puerto Apagado (P.A.), en rojo los de Puerto Encendido (P.E.), en amarillo el periodo Fondeado (F.), en marrón los de crucero C.R. y en violeta los de Operación (O.). En esta última condición de funcionamiento es donde se presentan los picos de consumo más elevados que se deben al mayor número de equipos encendidos y a la gran demanda de refrigeración (entre otros) que tenemos en el barco para los equipos electrónicos del SC.

Analizando las cuatro zonas de mayor y menor consumo que hemos enmarcado en verde y numerado del (1) al (4) se constata que, la de menor consumo (1) se presenta al principio del periodo de evaluación y se ajusta con una situación de carga mínima en puerto apagado con la mayoría de los sistemas apagados, siendo el HVAC el mayor consumidor presente en esta condición. El cuadro (2) recoge la condición de operación (O.) que es la más exigente de todas ellas según los datos obtenidos para este viaje de pruebas, presentando esta el pico de consumo energético, lo que es señal de la presencia de más sistemas encendidos.

El cuadro (3) se encuentra a caballo de dos modo, la condición de fondeado F. y la condición de crucero C.R.. Vemos que el consumo eléctrico baja dentro de la condición de F. debido a que la demanda se reduce y aquí, a un tiempo, se marca la subida de temperatura del agua de mar  $T_{am}$ , posteriormente comienza la subida del consumo con la entrada en modo C.R., lo que lleva aparejado una subida del consumo eléctrico en la condición de fondeado comenzando así, una paulatina bajada de la temperatura del agua de mar.

El cuadro (4) se corresponde con un modo de P.E., este presenta una subida de ambas curvas con tendencias muy parecidas.

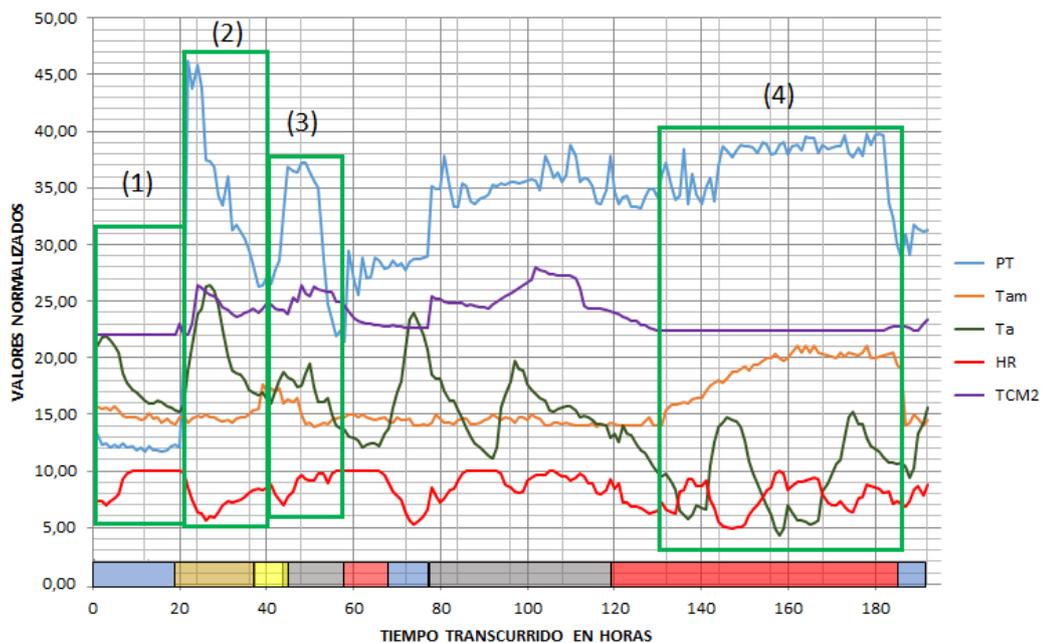


Figura 4.7: Variables analizadas. Viaje nº1 de prueba. Elaboración propia (2019)

Comparando las distintas curvas obtenidas tanto para las condiciones ambientales exteriores como para las ambientales interiores de los distintos locales considerados para el estudio, es la curva de temperatura del agua de mar la que en principio muestra una tendencia más parecida a la curva de consumos eléctricos lo que nos aconseja, a la hora acometer el análisis estadístico de los datos posteriores, pongamos especial interés en el estudio de estas zonas de las representaciones gráficas entre la curva correspondiente a los consumos eléctricos y la curva correspondiente a la temperatura del agua de mar.

Las restantes curvas sirven de apoyo al análisis así, las de temperatura y humedad,

se corresponden con datos de una zona de estudio enmarcada entre las dos condiciones extremas de verano e invierno empleadas para el estudio durante el diseño (véase cuadro 3.4). Las curvas de motores nos indican cuando están estos encendidos y apagados permitiendo discriminar en que modo (encendido/apagado) nos encontramos así, las subidas repentinas se corresponden con los encendidos de los equipos y las bajadas (más suaves), con el apagado y/o pérdida de calor de estos sistemas.

Por último, la temperatura del VLS (TVLS) de la figura 4.6, presenta una tendencia rectilínea como ya hemos dicho lo que se corresponde con la realidad del diseño que exige una condición de temperatura homogénea encontrándose esta dentro de los márgenes establecidos para la misma entorno a los 21°C (véase 3.4).

A la vista de los datos anteriores se procedió a efectuar nuevas tomas de datos en los distintos viajes incrementando el número de variables y eliminando otras como se puede comprobar en el cuadro 3.30.

#### 4.2.2. Análisis gráfico del viaje de Cádiz a Ferrol

En este viaje nº 2 analizado, se ha considerado la generación desglosada por motor de generación eléctrica (1A, 2A, 1B y 2B) para comprobar el comportamiento de los mismos desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo, es decir, para conocer como se estaba empleando la planta conforme a los criterios de diseño en el cual, se consideraba que en cada modo de funcionamiento se empleaban un número de motores concretos (cuadro 3.2).

Además también se optó por conocer el valor separado de temperatura arrojada por los sensores de temperatura para el agua de mar instalados en las tomas de mar principales en las cámaras de máquinas 3.10.

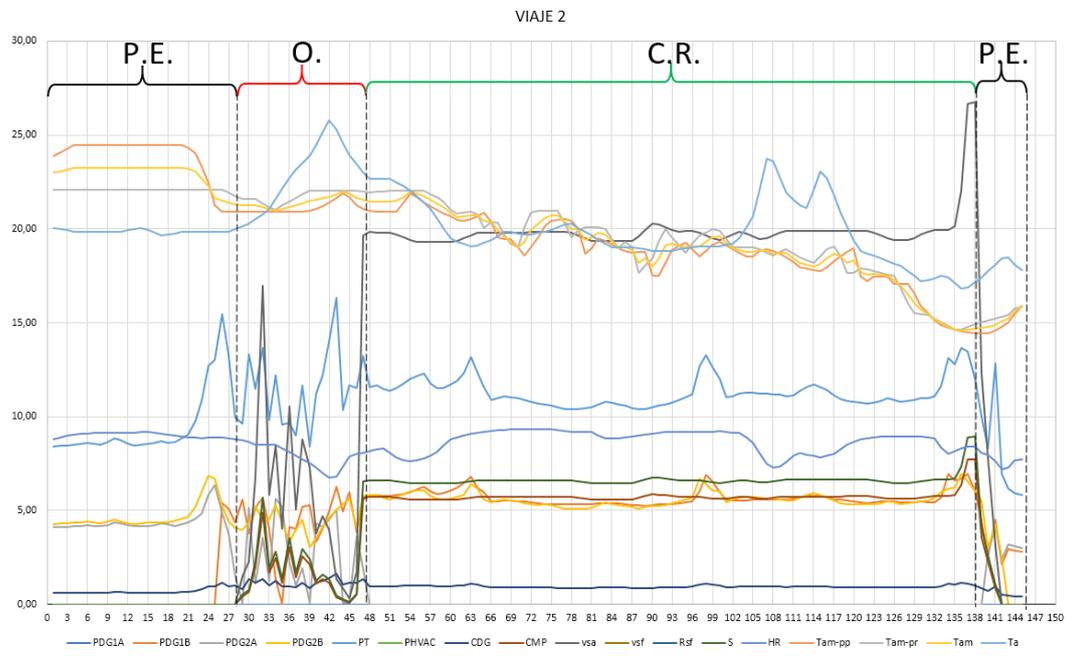


Figura 4.8: Viaje 2 Cádiz Ferrol. Elaboración propia (2019)

Analizando el gráfico que podemos ver en 4.8, comprobamos que la temperatura del agua de mar presenta en las situaciones de puerto mayor diferencia del entorno de 2,4 °C y, en el resto de modos analizados esta diferencia es mucho menor en el entorno de 1 a 0,4 °C de diferencia. De todas formas, esta variación es poco predecible, puesto que si bien las temperaturas mantienen la tendencia en todo momento, viendo como pasan de las aguas más cálidas en la bahía de Cádiz a las más frías de la ría de Ferrol, las variaciones no se mantiene correlativas, siendo en ocasiones más alta la de popa que la de proa y viceversa.

Otro elemento que podemos destacar viendo este gráfico (figura 4.7) es que las variables presentan comportamientos distintos en cada una de las cuatro zonas marcadas. En la primera de puerto encendido (P.E.) empezando por la izquierda, podemos ver como los valores en general se mantienen bastante estables hasta cerca del cambio de condición; en la segunda de operación (O.) los procesos son bastante estocásticos perdiéndose el comportamiento anterior; en el modo crucero (C.R.) donde, si bien existe variabilidad, el comportamiento es más estable; la última de las zonas de P.E., presenta un comportamiento similar a los últimos datos de la primera fase en este modo.

Este comportamiento al final y principio de las dos fases de P.E. es debido a que el buque se encuentra en una fase de preparación de salida a la mar (en la primera) y de entrada en puerto (en la segunda) y que, por tanto, refleja un periodo transitorio entre uno y otro modo de P.E. a O. en el primer momento y, de C.R. a P.E. en el segundo.

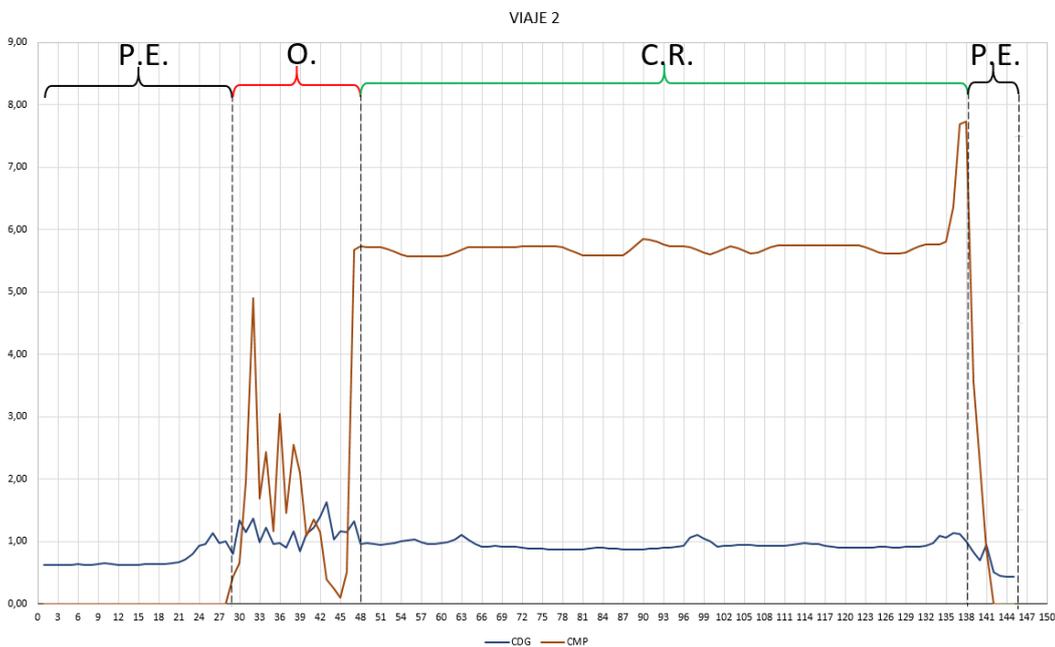


Figura 4.9: Consumos del viaje 2. Elaboración propia (2019)

Comparando los gráficos observamos que algunas de las variables presentan tendencias que pueden dar claves sobre su influencia en el consumo y de como los modos de funcionamiento afectan también a este así, en la figura 4.9, podemos ver representados los consumos de F-76. Vemos como la condición de P.E. presenta valores (en azul) en todo el periodo analizado algo menores que en las de O. y C.R.,

manteniendo gran variabilidad en el modo de operación, variación que desaparece en el caso del modo de crucero. Observando el consumo de combustible de la propulsión comprobamos que este es determinante en el consumo total del buque en el modo crucero (C.R.) como se puede ver en la tercera fase del viaje nº 2 siendo esta proporción mayor en algo más de tres veces el consumo de generación eléctrica. En el caso de la condición de operación (O.) es más variable siendo en ocasiones la demanda inferior a la de generación, esto es debido a que en operación, muchas de las funcionalidades requieren de velocidades bajas.

En la figura 4.10 vemos representado el consumo eléctrico del buque (azul) en todo el ciclo y los consumos de F-76. El consumo en situaciones de puerto es menor que en el resto de modos de funcionamiento analizados en este viaje y, de igual forma, el comportamiento estocástico en el modo de operación (O.) queda evidenciado en esta figura.

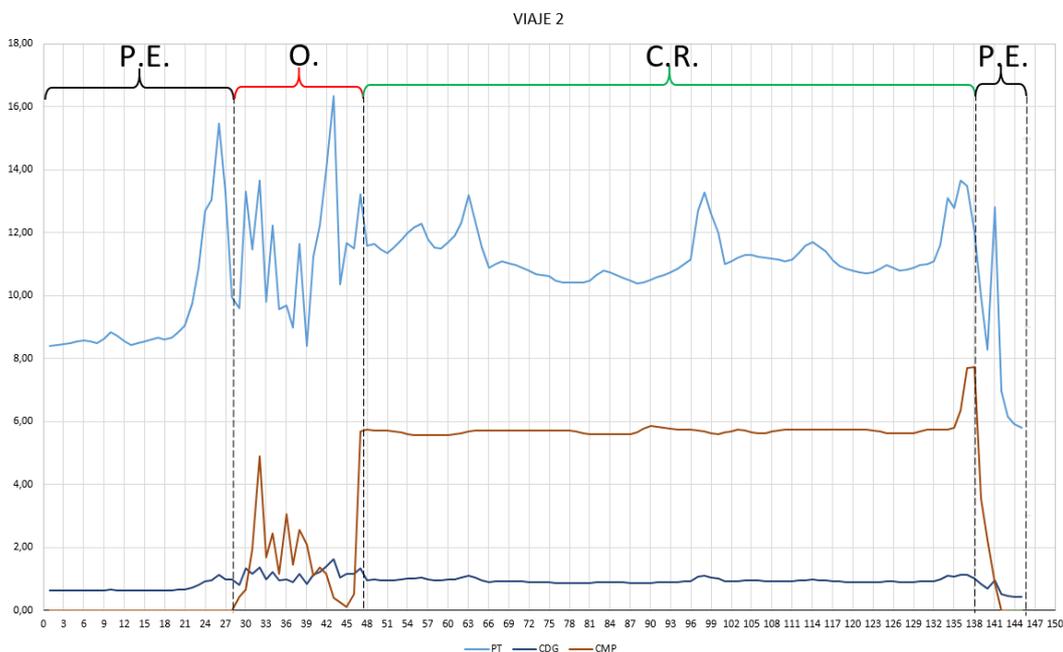


Figura 4.10: Variable PT y consumo F-76 del viaje 2. Elaboración propia (2019)

Comparando la tendencia de las curvas de temperatura de agua de mar con las de consumo eléctrico del buque, las cuales vemos representadas en la figura 4.11, vemos en azul el consumo eléctrico y tres curvas de similar tendencia en naranja, amarillo y gris que son la temperatura del agua de mar en la toma de popa (naranja) y la temperatura de la toma de mar en proa (gris), en amarillo tenemos valor medio de temperatura del agua de mar. Como hemos explicado en la figura 4.8, la diferencia se hace mayor en las condiciones de puerto lo que debe achacarse a que el buque está parado y, por tanto el agua más caliente tiende a concentrarse cerca del buque y de sus tomas de mar. Una vez que este inicia el cambio de modo de funcionamiento las temperaturas se igualan prácticamente y, en los modos de O. y C.R. estas temperaturas oscilan sin mantener una pauta clara de mayor o menor, obteniéndose mayor temperatura en ocasiones en proa y en otras en popa. Esto está relacionado con los sistemas activos en cada momento. el sentido decreciente de los valores debemos asociarlo al cambio que se produce de localización en el mar, pasando de la

## 4.2. ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS DATOS

Bahía de Cádiz a la ría de Ferrol en el Atlántico donde las aguas son más frías en promedio anual. En la fase de operación vemos que la temperatura se mantiene más estable que en el resto del viaje por lo que parece indicar que las bajas velocidades del buque mantienen la situación, invirtiendo la situación de las curvas, siendo más alta la de proa ( $T_{am-pr}$ ) que la de popa ( $T_{am-pp}$ ).

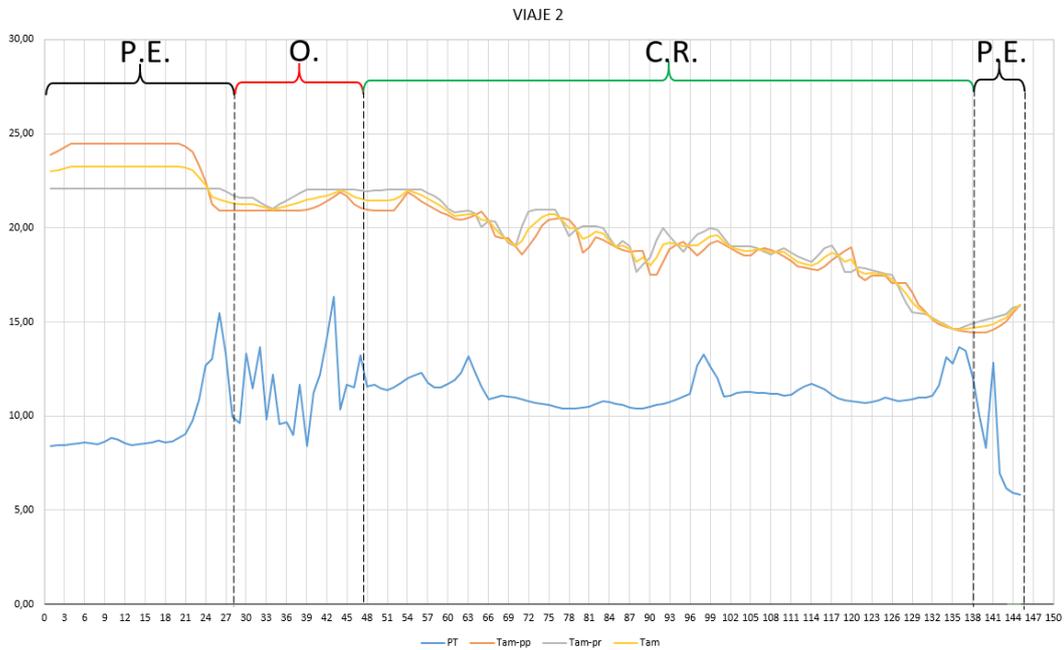


Figura 4.11: Variables PT y  $T_{am}$  del viaje 2. Elaboración propia (2019)

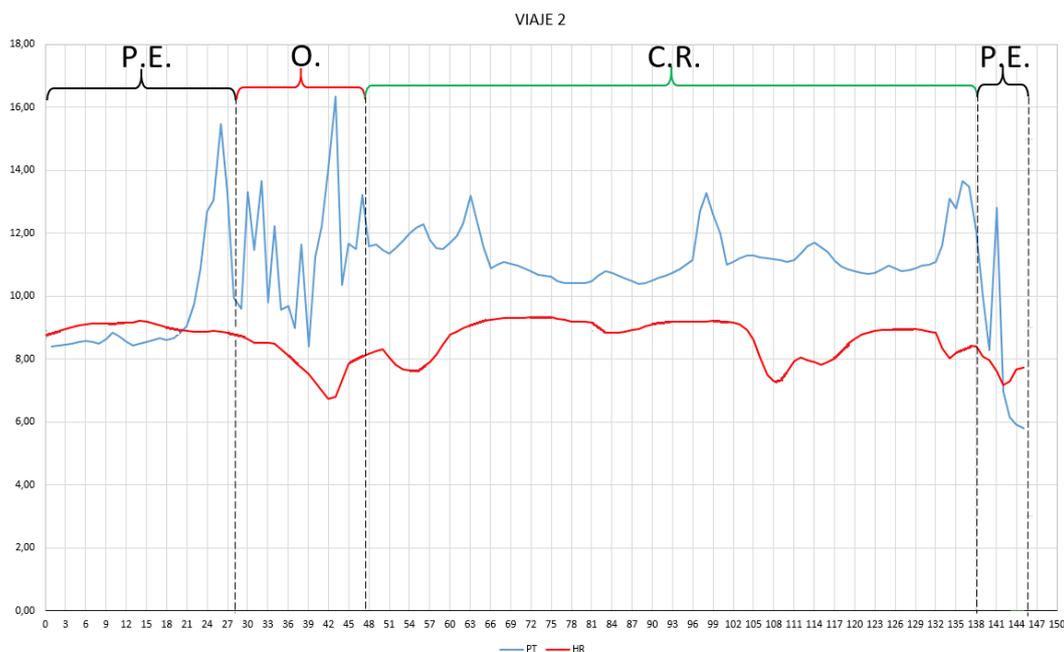


Figura 4.12: Variables PT y HR del viaje 2. Elaboración propia (2019)

Si observamos ahora la figura 4.12, podemos ver comparada la potencia producida para consumo eléctrico (PT) con la variable de humedad relativa (RH), en este caso no se observa una relación clara en el comportamiento de los gráficos de recorrido de las variables si bien, en algunas zonas presentan tendencias inversas, es decir, si nos fijamos en el mod C.R. vemos que los máximos de PT tienden a coincidir con los mínimos de humedad relativa lo que hace pensar que puede existir un valor de correlación inverso en estas zonas respecto de estas dos variables.

Para comprobar la afirmación anterior comparamos el consumo PT con el valor de la temperatura ambiente ( $T_a$ ) que podemos ver representadas en la figura 4.13. Comprobamos que sucede algo similar entre los picos de consumo PT y los máximos de la curva  $T_a$  en la misma etapa de crucero (C.R.); esta no es tan acusada como con la HR, pero apunta cierta correlación ya que, generalmente, los máximos de humedad coinciden con las temperaturas más bajas del día y viceversa.

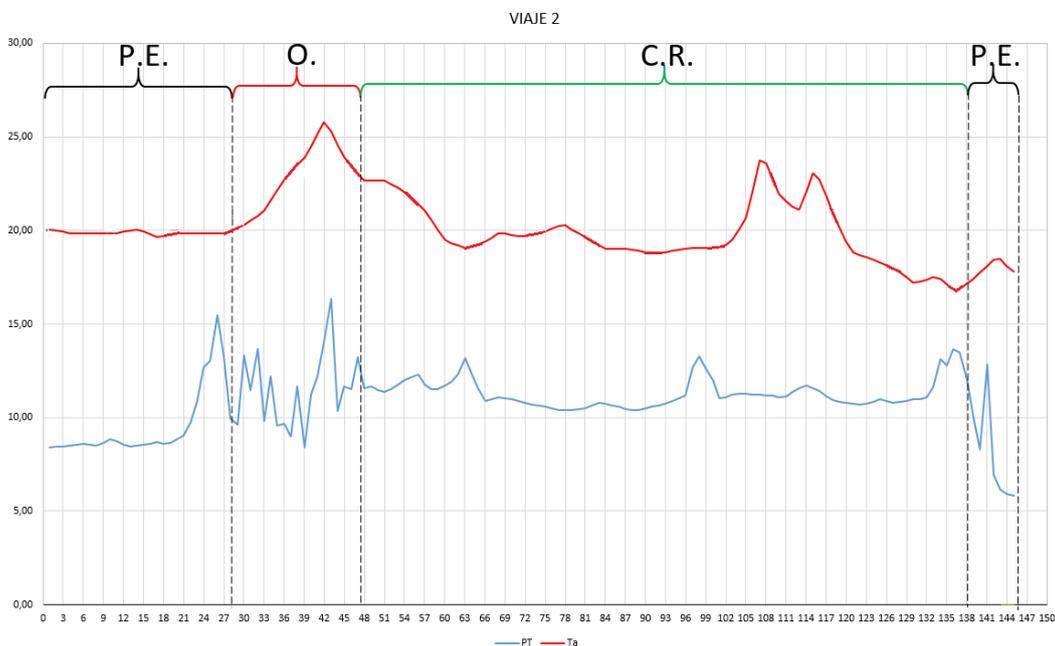


Figura 4.13: Variables PT y  $T_a$  del viaje 2. Elaboración propia (2019)

Realizaremos ahora lo mismo con el resto de viajes teniendo presente que las tendencias demostradas en los casos más cortos números 1 y 2 serán las pistas que nos orientarán en los casos siguientes.

### 4.2.3. Análisis gráfico del viaje a EE.UU.

En la figura 4.14 podemos ver la representación gráfica de las variables del viaje a EE.UU. En este caso el número de variables y el periodo temporal se ampliaron con respecto a los viajes nº1 y 2. El viaje nº3 se puede ver dividido en 11 etapas o tramos como ya hemos comentado con anterioridad. A simple vista si se pueden observar ciertas tendencias en función del modo de funcionamiento que consideremos y, al igual que hemos hecho antes, separaremos aquellas variables que nos puedan dar indicaciones sobre el comportamiento energético del sistema buque.

## 4.2. ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS DATOS

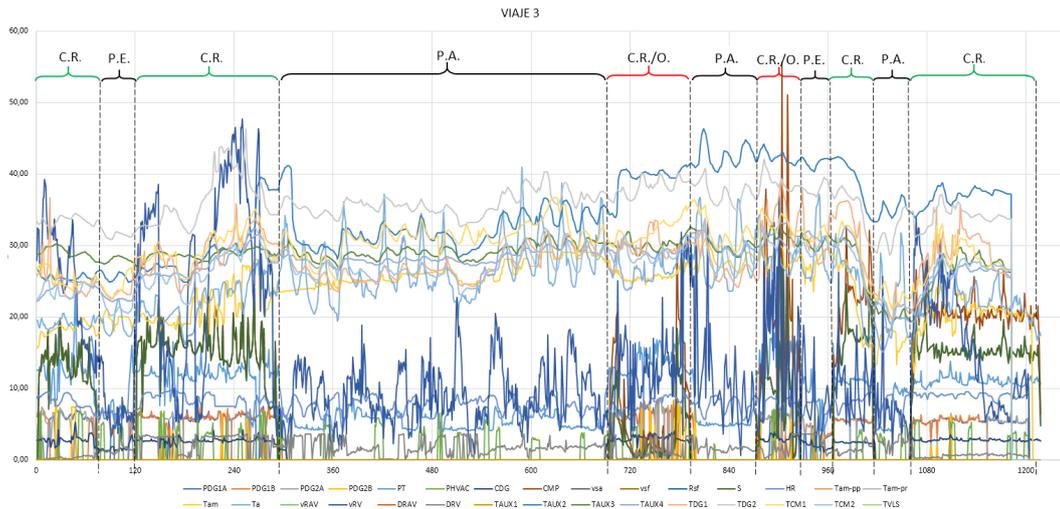


Figura 4.14: Viaje 3 a EE.UU. Elaboración propia (2019)

En la figura 4.15 vemos los consumos del buque en los distintos periodos o fases que se han considerado en este viaje. Podemos afirmar que el consumo de combustible empleado para la navegación es superior al consumo de combustible dedicado a la generación eléctrica del buque, esto hace pensar que las actuaciones más importantes en la reducción del consumo de F-76 deben orientarse a la reducción del consumo en la propulsión. El consumo de combustible dedicado a la generación eléctrica es variable pero más predecible que en el caso de la propulsión. Se confirma el comportamiento estocástico del consumo en la propulsión y generación en las fases en las que se desarrollan operaciones (O.) como se puede ver en las zonas con llave en color rojo. En el resto, si bien es variables, estas variaciones se concentran en valores estables que más tienen que ver con las variaciones de las condiciones del estado de la mar, viento y velocidad del buque que con otra cosa.

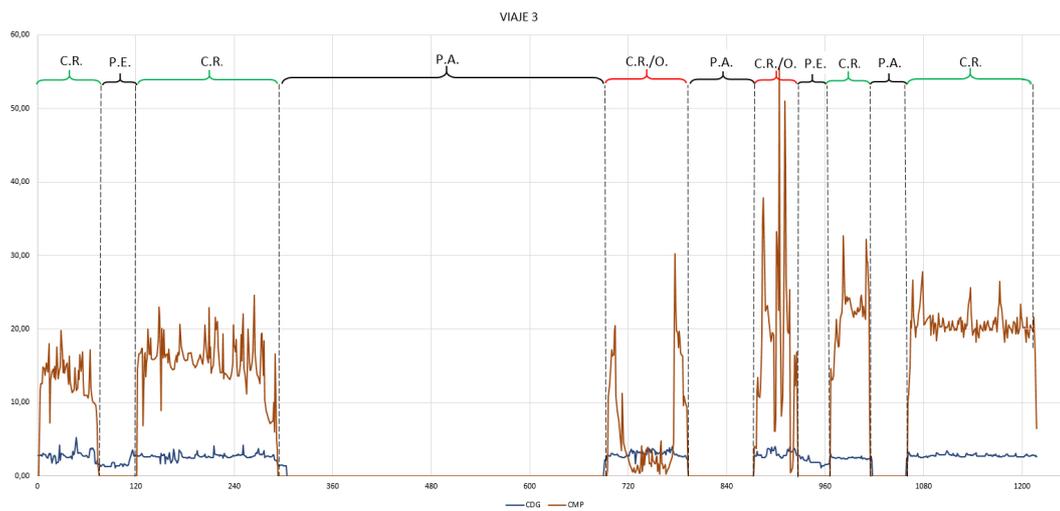


Figura 4.15: Consumos F-76 viaje 3. Elaboración propia (2019)

La figura 4.16 muestra la curva de consumo eléctrico con un comportamiento similar al que se presenta en el caso del consumo de combustible. De igual forma

## 4.2. ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS DATOS

que en los casos anteriores, el consumo en puerto es menor que en el caso de modos como el de crucero (C.R.) u operación (O.). El largo periodo de puerto apagado (P.A.) en Norfolk, muestra variaciones del consumo que, en principio, no son asignables a otra cuestión que la preparación de los lanzamientos de misiles efectuados en las fases en modo de operación (O.).

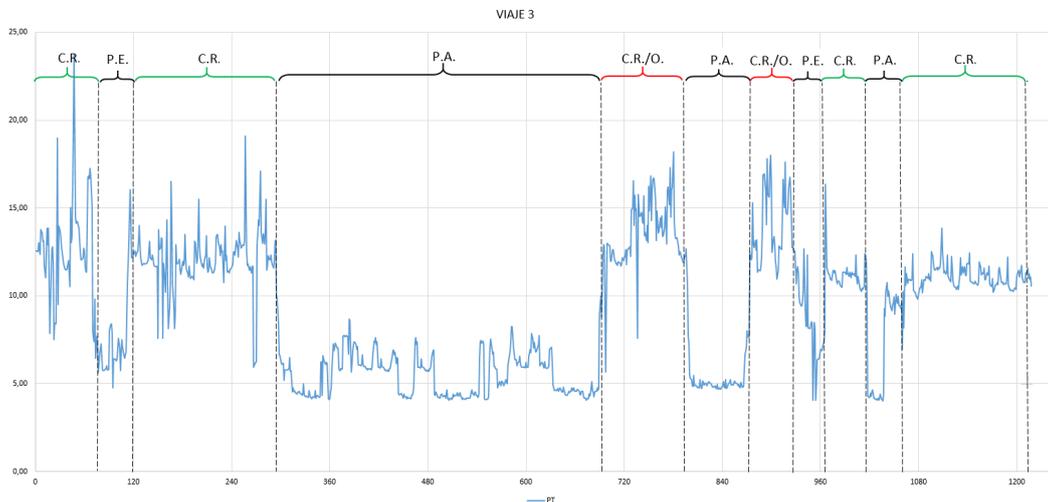


Figura 4.16: Variable PT viaje 3. Elaboración propia (2019)

Comparativamente con el consumo de F-76, la curva de generación que podemos ver en la figura 4.16, desvela que el comportamiento y el consumo es algo mayor en el modo de operación (O.). Debemos constatar aquí que en las fases de modo C.R., se presentan ciertos picos y tendencia más estocástica.

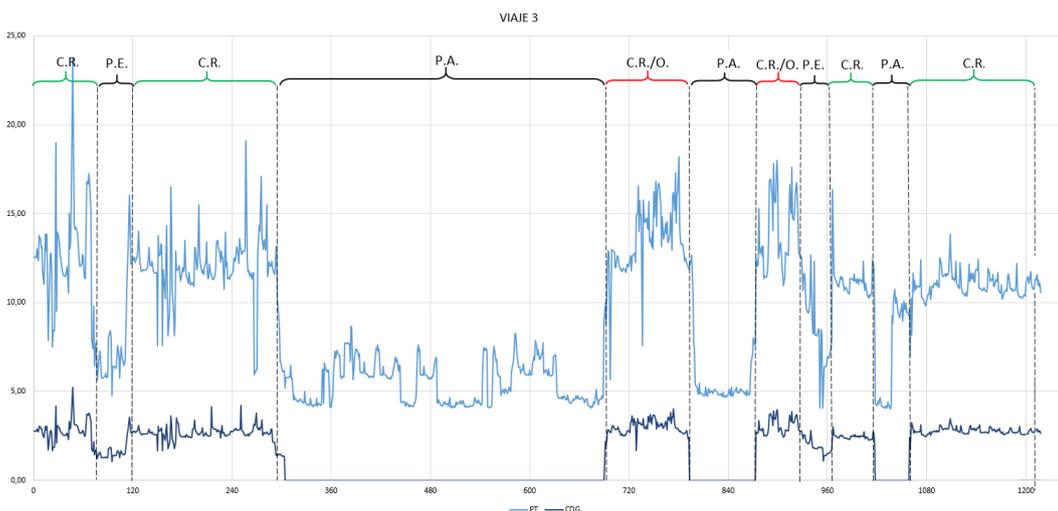


Figura 4.17: Variables PT y consumo DD.GG. viaje 3. Elaboración propia (2019)

Quede constancia que las condiciones ambientales en el viaje de ida a Norfolk fueron adversas, con vientos fuertes y estados de la mar que no favorecen la navegación por lo que, al igual que se puede ver en las curvas de consumos de combustible,

## 4.2. ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS DATOS

el consumo eléctrico se comportó de forma similar, produciéndose mayor variabilidad si comparamos la generación con el consumo eléctrico (figura 4.17). En la figura 4.18 podemos ver la toma de datos aleatoria que se hizo del consumo del sistema de climatización del buque (HVAC). Podemos ver en color verde en la figura las horquillas temporales medidas para este sistema, comprobando que es el sistema más demandante en esos momentos requiriendo buena parte de consumo eléctrico del buque.

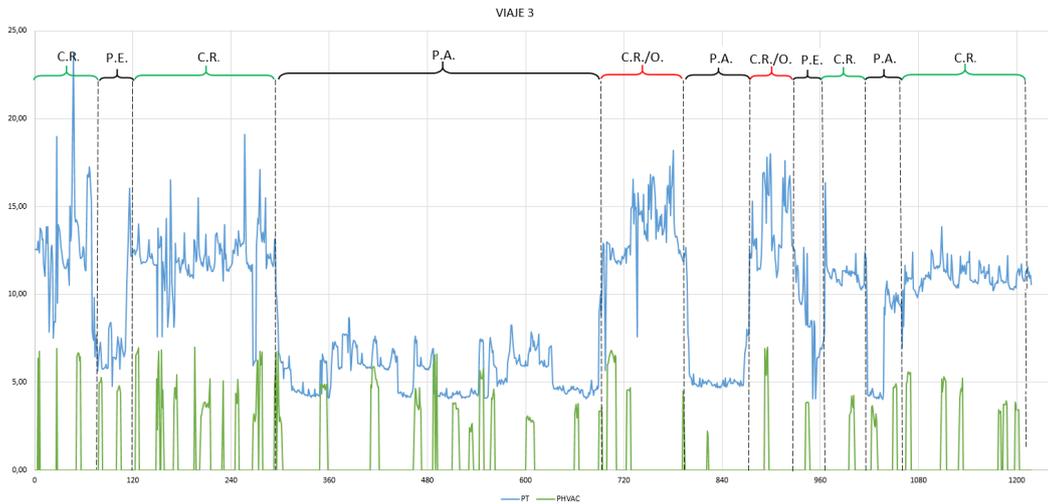


Figura 4.18: Variables PT y HVAC viaje 3. Elaboración propia (2019)

La figura 4.19 presenta los valores de PT y de temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ). Podemos ver en los periodos de puerto tanto de P.E. como de P.A., que las temperaturas tienden a aumentar como hemos visto para los periodos de puerto de los viajes nº 1 y nº2 con la acumulación de tiempo en estos modos.

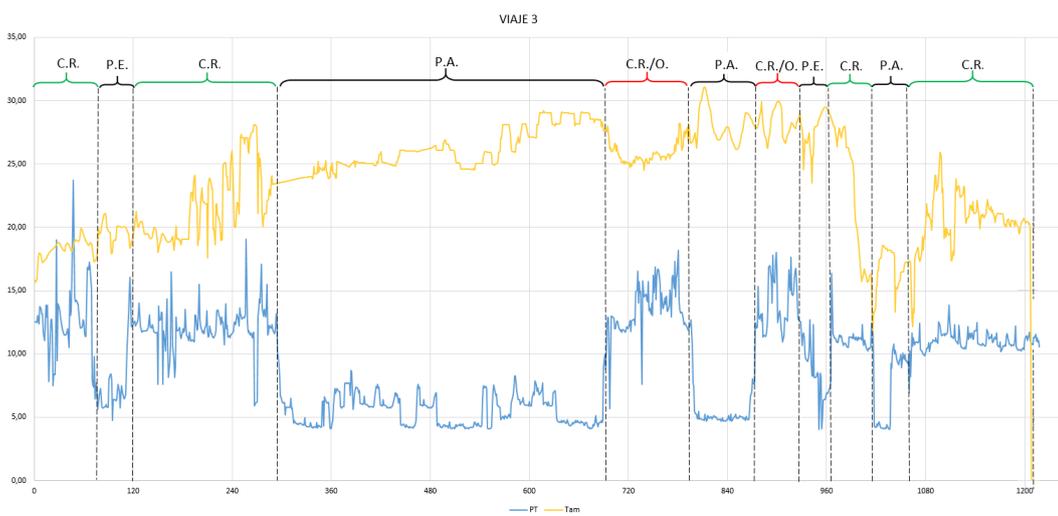


Figura 4.19: Variables PT y  $T_{am}$  del viaje 3. Elaboración propia (2019)

En este caso, considerando el prolongado periodo de puerto en Norfolk en modo

P.A.(cuarto por la izquierda) se presenta un proceso similar en el que la temperatura aumenta paulatinamente y una vez sale a navegar esta baja; lo mismo sucede con el resto de periodos de puerto donde, en el caso de P.E. la variación es algo más acusada.

La zona en la que se encontraba el buque era un muelle en la base naval del mismo nombre, en el que el movimiento de aguas era limitado y en cuya proximidad se encontraban otros buques en la misma condición.

Debemos tener presente que, aunque no se esté generando la corriente en el buque, si existen otros equipos funcionando como son los equipos de HVAC, las calderas de agua caliente, equipos de cocina, sistemas electrónicos y de armas o alumbrado, que consumen corriente y algunos necesitan de agua para su refrigeración como es el caso del radar SPY.

Todas estas descargas de agua con mayor carga térmica tras su paso por los equipos, son un elemento para tener presente en el análisis de la temperatura del agua de mar. Por otro lado los distintos periodos de cruceo (C.R.), guardan cierta relación entre el consumo y la temperatura del agua ( $T_{am}$ ) pero en este caso, al estar el buque en movimiento en aguas abiertas, la correlación puede deberse más, a la influencia de la temperatura del agua de mar en la zona en la que se encuentra el buque en el consumo, que no a la actividad interior como puede atribuirse en el caso de las situaciones de puerto.

Podemos decir que en este caso la acción combinada de ambas variables influye en cierta medida en el consumo eléctrico del buque en todas las condiciones analizadas y así, tomando el primer periodo de operación (O.), podemos ver que aunque estocástico, la tendencia es creciente en todas las variables, esto es indicador de existencia de cierta correlación línea positiva entre estas variables ambientales y el consumo (PT).

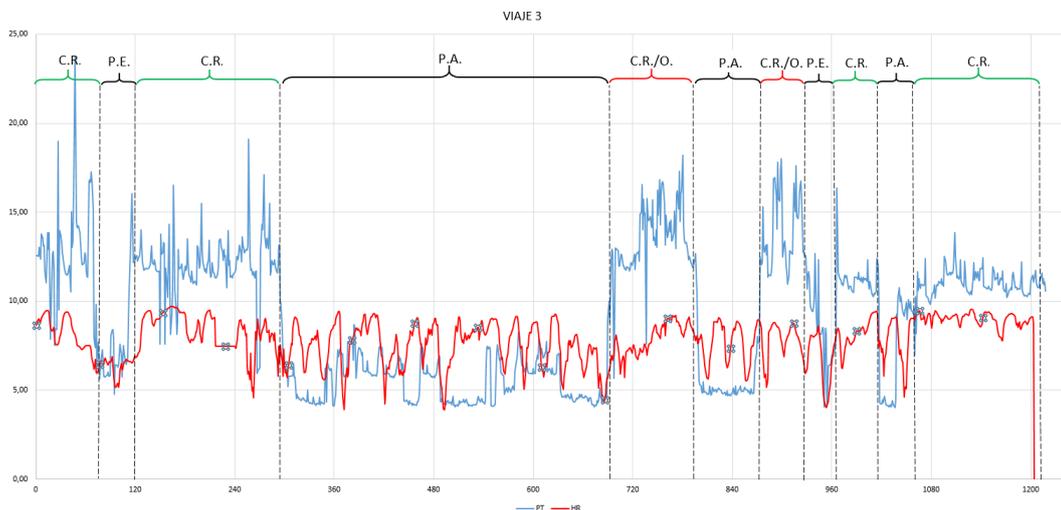


Figura 4.20: Variables PT y HR del viaje 3. Elaboración propia (2019)

Las figuras 4.20 y 4.21 presentan la PT con respecto a la humedad relativa (HR) y la temperatura del aire ( $T_a$ ). Tomando en primer lugar el periodo de estancia en el puerto de Norfolk, podemos comprobar la tendencia inversa entre HR y  $T_a$  como es habitual, y se observa que la ( $T_a$ ) más elevada tiene cierta influencia en el aumento

del consumo eléctrico (PT).

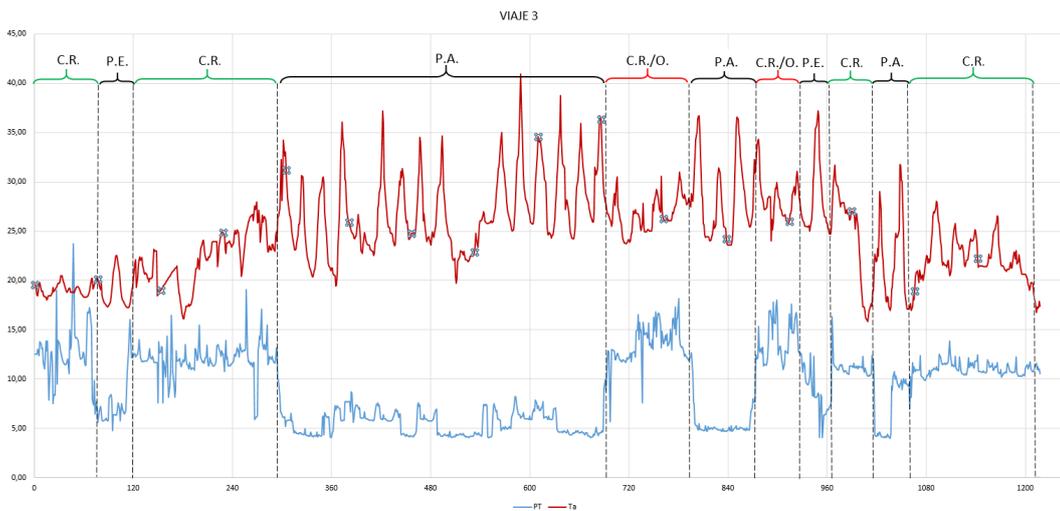


Figura 4.21: Variables PT y  $T_a$  del viaje 3. Elaboración propia (2019)

En la figura 4.22 tenemos representadas las temperaturas de las cámaras de diésel generadores (DD.GG.) comparada con el consumo de los motores que, por otro lado, nos está dando información sobre el factor de utilización de los mismos. Podemos ver que la temperatura está asociada al uso de los motores es decir, cuando estos están en funcionamiento la temperatura subirá, de todas formas esta debe mantenerse en rango aceptables y dentro de los marcados para el diseño pues la ventilación de los locales de máquinas así lo exige. Podemos ver que en los periodos de puerto apagado (P.A.) los locales de máquinas sufren oscilaciones no tan acusadas como en el resto de fases o periodos en otros modos, estas variaciones se deben a que en las mismas cámaras existen instalados equipos que disipan calor como son las unidades de agua refrigerada y otros dedicados a distintos fines en funcionamiento, a lo que debemos sumar, las variaciones de las condiciones ambientales también influirán en las variaciones de la temperatura.

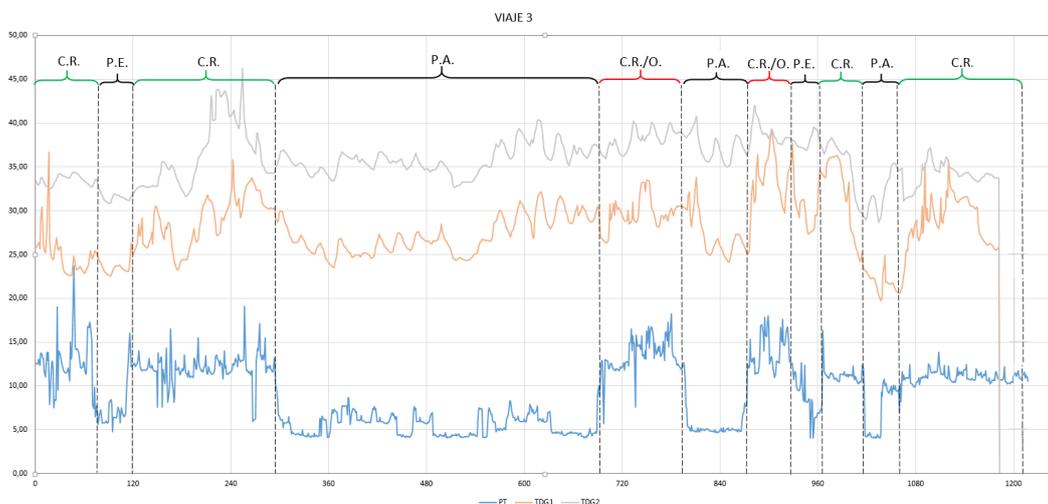


Figura 4.22: Variables PT Temperatura DD.GG. viaje 3. Elaboración propia (2019)

Vamos a comprobar ahora el comportamiento en una serie temporal larga de crucero. Esta serie temporal se tomó en el viaje que el buque hizo en este modo de crucero a Australia en 2017 navegando por el océano Atlántico, mar Mediterráneo, mar Rojo y océano Índico.

#### 4.2.4. Análisis gráfico del viaje a Australia

En la figura 4.23 podemos ver los valores representados gráficamente de las variables analizadas en el cuarto viaje. En este viaje se analiza fundamentalmente el modo C.R. del buque desglosado en cinco etapas. la base de datos ha incluido algunos valores de P.E. que no serán considerados en este análisis de recorrido marcándose las cinco fases, zonas o etapas en las que se dividió el viaje a Australia desde Ferrol exclusivamente para el modo de crucero. De forma general se pueden apreciar ciertos patrones repetitivos en muchas de las variables analizadas y diferencias en el comportamiento de las mismas si nos referimos a los límites de cada una de ellas.

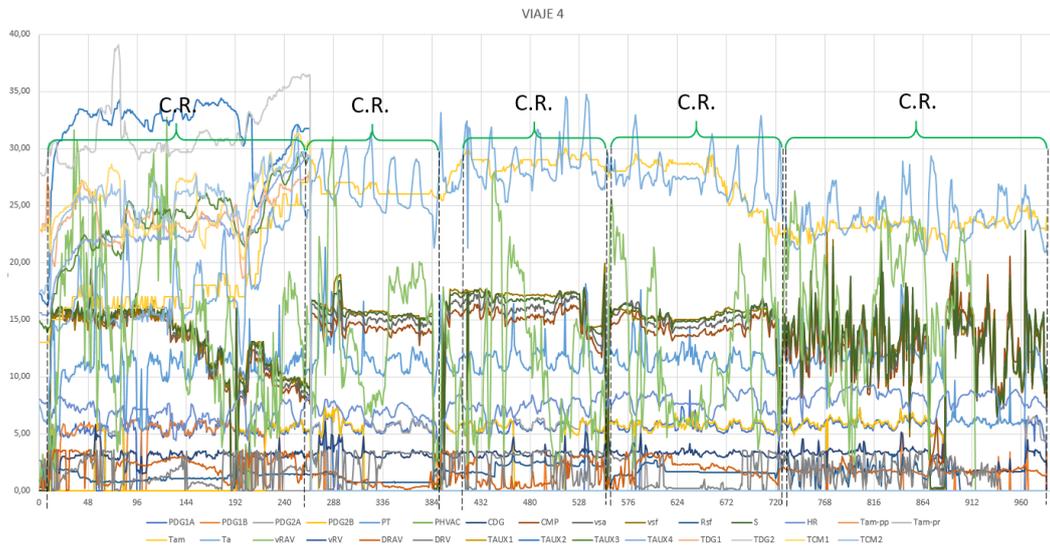


Figura 4.23: Viaje 4 a Australia. Elaboración propia (2019)

En la figura 4.24 hemos representado los consumos de F-76 tanto para generación como para propulsión (azul y marrón respectivamente como en el resto de los casos) y la temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ) en amarillo como valor medio. No existe a simple vista una correlación en tendencias por lo que se requiere de un análisis de correlaciones que permita establecer las mismas y su entidad.

## 4.2. ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS DATOS

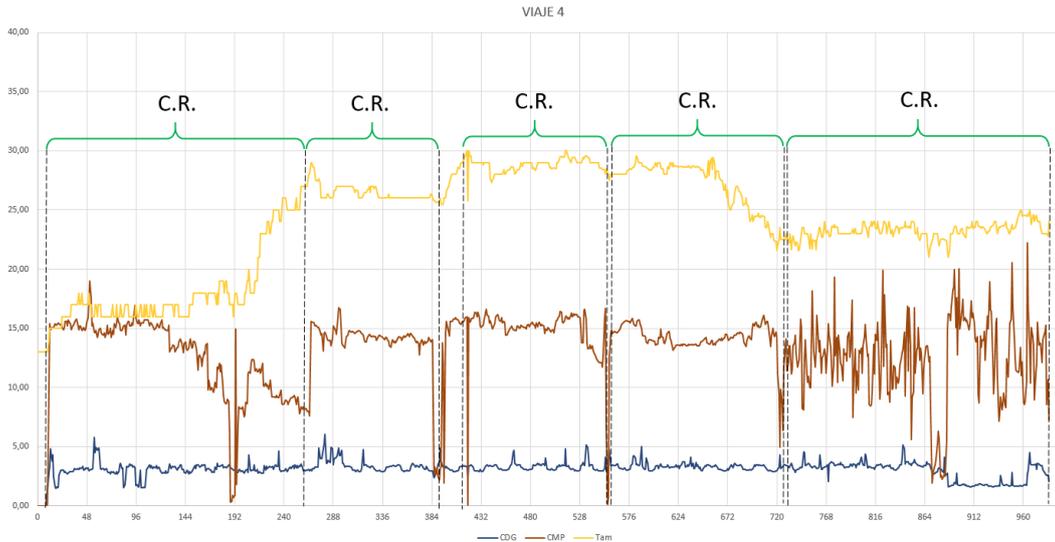


Figura 4.24: Variables  $T_{am}$ , PT y consumo DD.GG. viaje 4. Elaboración propia (2019)

En los casos anteriores se observa cierta tendencia a subir esta en las condiciones de P.A. y P.E. pero no así en las de crucero de este viaje n° 4, la variabilidad de la temperatura del agua de mar parece más relacionada, en un primer momento, con la variabilidad térmica del agua dependiendo de la situación del buque en el mar es decir, en que región geográfica se encuentra en cada momento. Debemos recordar que en las cinco etapas que se representan pasa de una situación en el Atlántico a una situación en el hemisferio Sur en el Índico. Atravesando toda la franja de los Trópicos. La primera etapa se corresponde con el paso del Atlántico al Mediterráneo y parte del mar Rojo y con un evidente aumento de la temperatura del agua de mar, las tres etapas centrales son en las que se atraviesa el Índico en cuya franja, las temperaturas de agua de mar son las más altas entre los Trópicos.

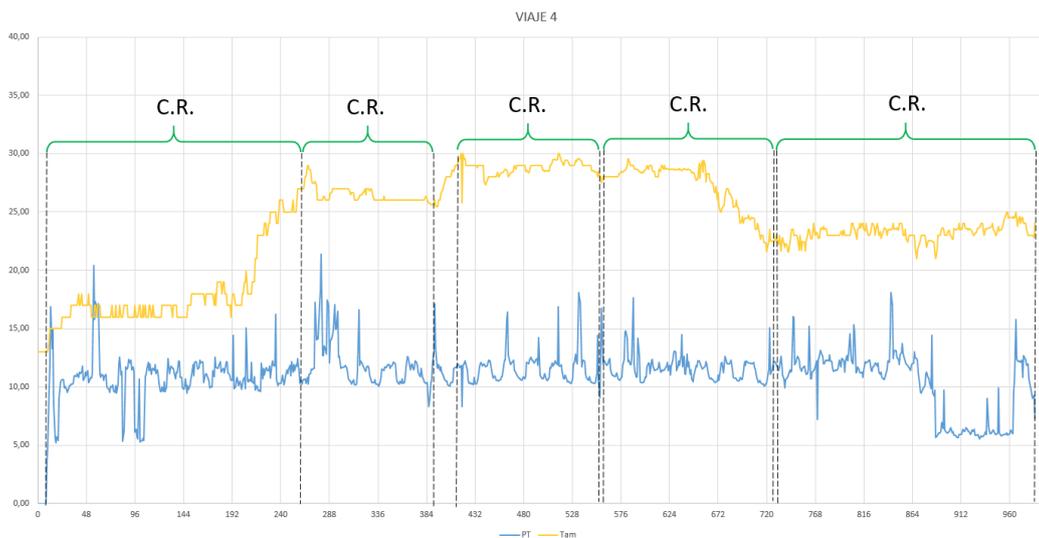


Figura 4.25: Variables PT y  $T_{am}$  en viaje 4. Elaboración propia (2019)

Con respecto al consumo de la propulsión en la quinta etapa (ya en Australia)

podemos ver que el comportamiento estocástico de este, se debe a que esa etapa coincide con la primera fase de entrenamiento de dotaciones de la marina Australiana y la alta variabilidad se corresponde con la ejecución de distintos ejercicios de adiestramiento. Esta etapa puede ser considerada como de operación (O.) a la vista de los comportamientos de las variables en el resto de casos si bien, se ha considerado en principio como C.R. puesto que las operaciones reales se circunscriben a periodos cortos en el tiempo. En la figura 4.25 podemos ver de forma separada el consumo de los DD.GG. comparado con la temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ) con una escala mayor. Podemos afirmar que la última de las fases se encuentra más dentro de una fase en modo de operación debido a la mayor variabilidad con respecto al resto de periodos analizados. Las posibles correlaciones con la  $T_{am}$  no se pueden apreciar gráficamente en este caso.

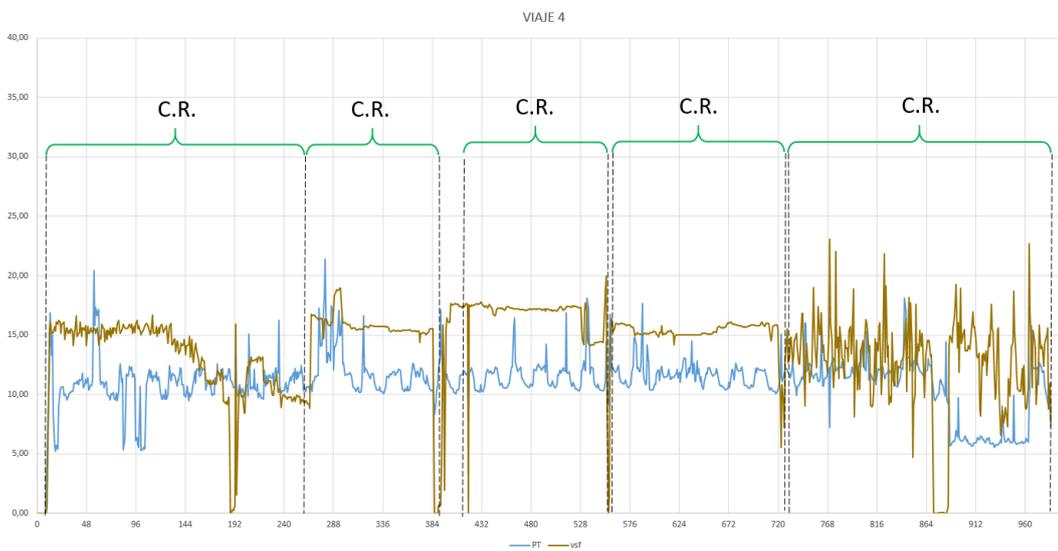


Figura 4.26: Variables PT y  $v_{sf}$  en viaje 4. Elaboración propia (2019)

La figura 4.26 representa las variables de potencia eléctrica generada (PT) y los valores de recorrido de la velocidad sobre el fondo. Este gráfico demuestra que la velocidad del buque no afecta en gran medida al consumo eléctrico del buque, lo que está en consonancia con la separación que se establece entre la propulsión y la generación en esta clase de buques. La velocidad sobre el fondo está más relacionada con los valores de consumo de combustible de la propulsión y su comportamiento es similar en tendencias al del consumo de la propulsión.

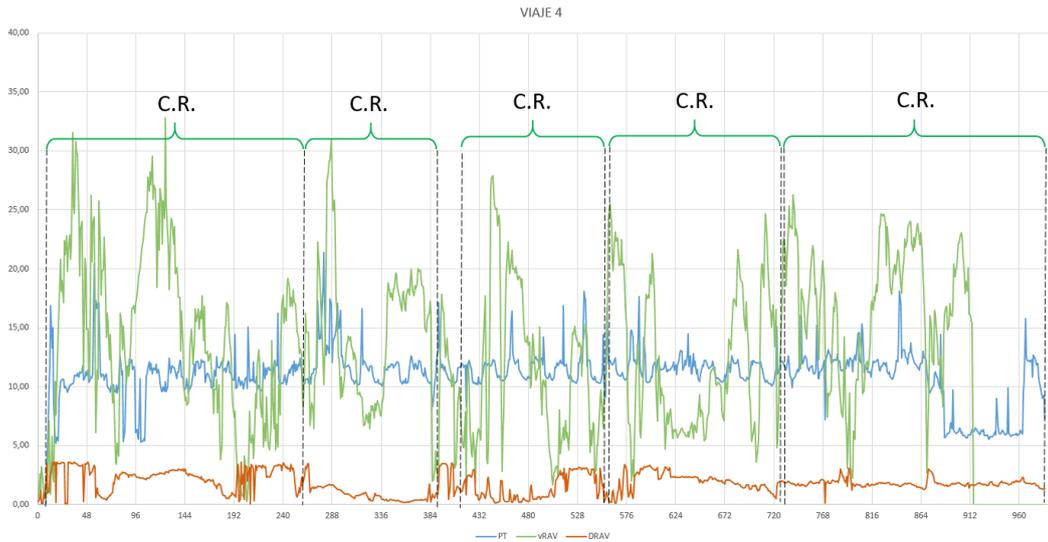


Figura 4.27: Variables  $v_{ra}$  y  $D_{ra}$  en viaje 4. Elaboración propia (2019)

La figura 4.27 no presenta gráficamente tendencias visibles de relación entre variables al igual que sucede con variables de velocidad, rumbo, dirección del viento con respecto al consumo, todas ellas presentan comportamientos distintos al del consumo eléctrico como podemos ver en la figura donde en verde aparece la dirección real del viento y la velocidad de este. Estas variables requerirán de un análisis más depurado en base a correlaciones o regresiones que permitan establecer sus relaciones.

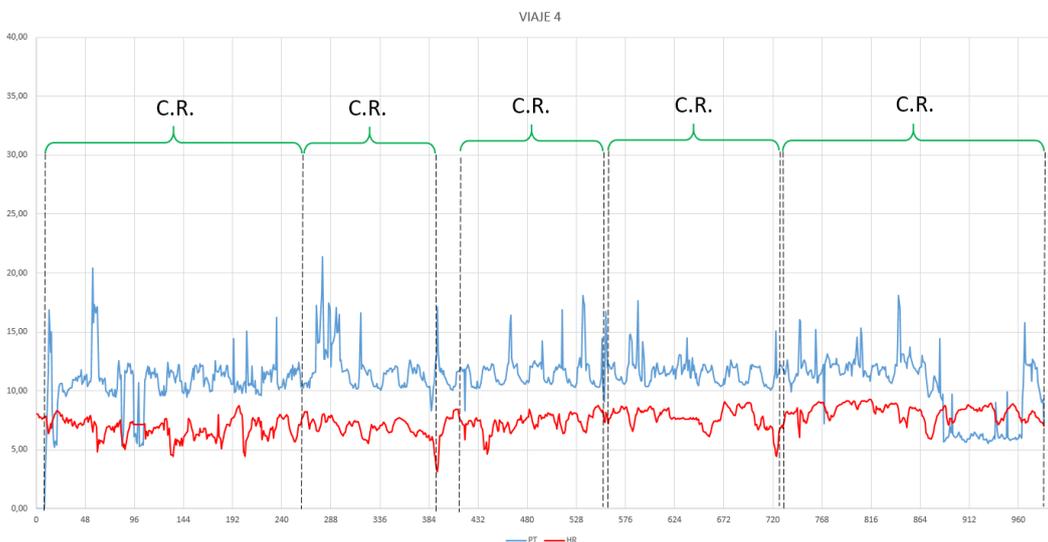


Figura 4.28: Variables PT y HR en viaje 4. Elaboración propia (2019)

Por último, como en el resto de los casos, analizaremos el comportamiento del consumo eléctrico (PT), la humedad relativa (HR) y la temperatura del aire ( $T_a$ ). Las figuras 4.28 y 4.29 representan estas variables. Podemos comprobar la tendencia inversa entre HR y  $T_a$  como es habitual, y comprobar que las temperaturas ambiente

más elevadas tienen cierta influencia en el aumento del consumo eléctrico (PT) como ya comentamos en el viaje a EE.UU., esto da una orientación del comportamiento de las correlaciones matemáticas que analizaremos más adelante.

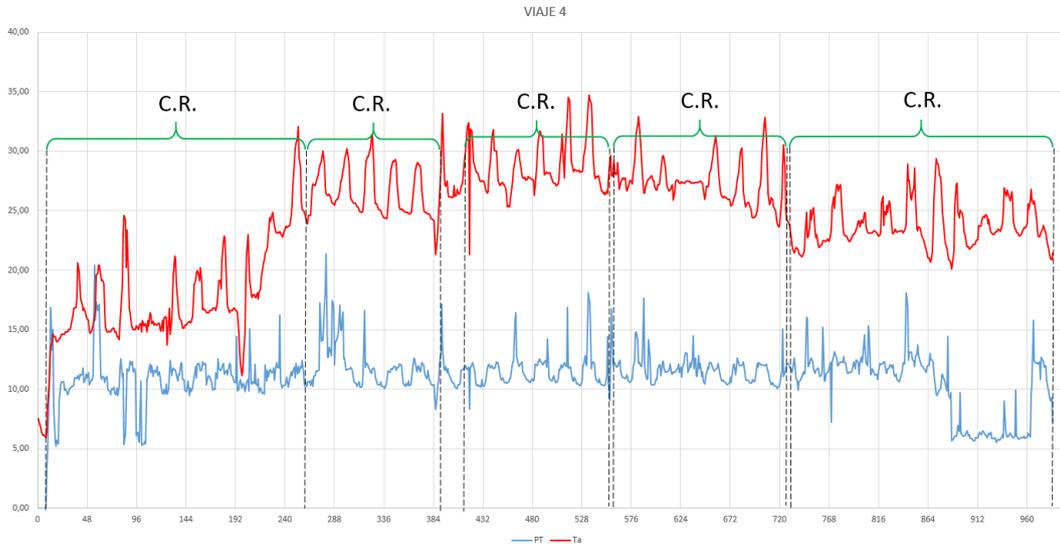


Figura 4.29: Variables PT y  $T_a$  en viaje 4. Elaboración propia (2019)

De este análisis gráfico de los datos, podemos determinar la necesidad de calcular las correlaciones entre las variables, lo que nos permitirá conocer el nivel de influencia de las mismas en el consumo energético y por tanto en la eficiencia energética del sistema.

### 4.3. Análisis de correlaciones

En esta sección vamos a considerar los datos de los distintos viajes a los que aplicaremos formulación de correlación de Pearson para determinar cuales son las correlaciones existentes entre las distintas variables, su fortaleza y, de esta forma, discriminar las variables que afectan al consumo del buque. Las correlaciones permiten trabajar en el campo multivariante al relacionar las oscilaciones de unas variables con otras. La formulación que aplicaremos será la siguiente:

$$r_{xy} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (4.1)$$

Dónde:

- El valor de  $r$  es el valor de la correlación.
- El numerador representa el valor de la covarianza de las matrices  $X, Y$ .
- Las matrices  $X, Y$  representan las variables estudiadas.
- El denominador es el producto de las desviaciones típicas de las variables  $(x, y)$ .

Para determinar la fortaleza de las correlaciones calculadas con 4.1 nos apoyaremos en los siguientes valores base del coeficiente:

- 1,00 = Correlación negativa perfecta.
- 0,90 = Correlación negativa muy fuerte.
- 0,75 = Correlación negativa considerable.
- 0,50 = Correlación negativa media.
- 0,10 = Correlación negativa débil.
- 0,00 = No existe correlación lineal alguna entre las variables.
- 0,10 = Correlación positiva débil.
- 0,50 = Correlación positiva media.
- 0,75 = Correlación positiva considerable.
- 0,90 = Correlación positiva muy fuerte.
- 1,00 = Correlación positiva perfecta.

En base a estos parámetros analizaremos los valores obtenidos para los datos recogidos en cada uno de los viajes.

### 4.3.1. Correlaciones del viaje de prueba en Ferrol

Como ya hemos dicho, calcularemos el valor del coeficiente de correlación de Pearson  $r \in [-1, 1]$  para una serie de pares de variables. Este coeficiente da una indicación de cómo los diferentes valores afectan el consumo del barco. El coeficiente de Pearson asume un modelo de regresión lineal y se ha elegido por su simplicidad y permitir el análisis multivariante. Es posible utilizar otros indicadores estadísticos, como la correlación de Spearman en forma no paramétrica, que solo asume una relación monótonica, no necesariamente lineal, entre las variables. Los pares de variables consideradas en el análisis son los siguientes:  $PT \sim T_{am}$ ,  $PT \sim Ta$ ,  $PT \sim HR$ ,  $PT \sim T_{CM2}$ ,  $T_{am} \sim T_{CM2}$ . Los coeficientes de correlación calculados a partir de la matriz de datos del viaje arrojó los valores que podemos ver en la tabla 4.2.

<b>Modo</b>	$r_{PT, T_{am}}$	$r_{PT, Ta}$	$r_{PT, HR}$	$r_{PT, T_{CM2}}$	$r_{T_{am}, T_{CM2}}$
Puerto encendido	0,48	-0,71	-0,48	0,83	0,16
Puerto Apagado	0,63	-0,26	-0,38	-0,26	-0,65
Fondeado	-0,76	0,89	-0,83	-0,38	0,62
Crucero	0,24	-0,15	0,26	0,20	-0,14
Operación	0,22	0,70	-0,75	0,54	0,48
<b>Total</b>	0,35	-0,30	-0,29	0,26	-0,47

Cuadro 4.2: Coeficientes de Pearson del viaje 1. Elaboración propia (2019)

Dado que las necesidades energéticas de la nave son bastante diferentes según el modo de operación (como hemos visto en 4.2.1), es importante hacer un análisis

estadístico de correlaciones que separe los modos funcionales. A partir de los datos del cuadro 4.2, se pueden hacer los siguientes comentarios:

1. Para los modos de P.A. y P.E., los valores de  $r$  que relacionan el consumo y la temperatura del agua de mar son positivos. Valen  $r = 0,48$  y  $r = 0,63$ , respectivamente lo que indica correlaciones medias a considerables.
2. Para el modo F., el mayor valor de la correlación es entre el consumo y la temperatura ambiente, con un valor de  $r = 0,89$ . Esta condición también presenta considerables correlaciones negativas entre el consumo y la temperatura del agua de mar ( $r = -0,76$ ) y entre el consumo de energía y la humedad relativa ( $r = -0,83$ ). Sin embargo, debe decirse que este modo es el que tiene una menor cantidad de datos y no podemos hacer afirmaciones más allá de las evidencias de los datos.
3. El modo C.R. tiene bajos valores de correlación. El más alto de  $|r|$  relaciona el consumo eléctrico y la humedad relativa, con un valor  $r = 0,26$  que es un valor de correlación débil.
4. Para el modo O. , el más alto de  $|r|$  corresponde a una correlación negativa entre el consumo eléctrico y la humedad relativa y a una correlación positiva entre el consumo y la temperatura ambiente.

En general, el consumo de electricidad en los diversos modos de operación está influenciado por las variables ambientales en distinta medida. Considerando  $r$  para todo el conjunto de datos, todas las correlaciones son moderadas, y podemos concluir que el factor externo más importante es la temperatura del agua de mar, seguida por la temperatura ambiente y la humedad relativa.

Por otro lado, la variable  $T_{am}$  presenta correlaciones positivas considerables para los modos de puerto P.A. y P.E, especialmente para este último modo. Esto subraya la conveniencia de dividir la muestra de datos en modos, ya que de lo contrario este efecto no sería visible. Para enfatizar la correlación de la temperatura del agua de mar con el consumo de energía en modo de puerto, presentamos un gráfico de dispersión como el de la figura 4.30 con los datos utilizados para el gráfico puerto encendido donde el coeficiente de correlación de Pearson es 0,80. La línea roja representa el ajuste lineal y la línea azul los intervalos de predicción a un nivel de confianza del 95% basado en un modelo de regresión lineal de los datos.

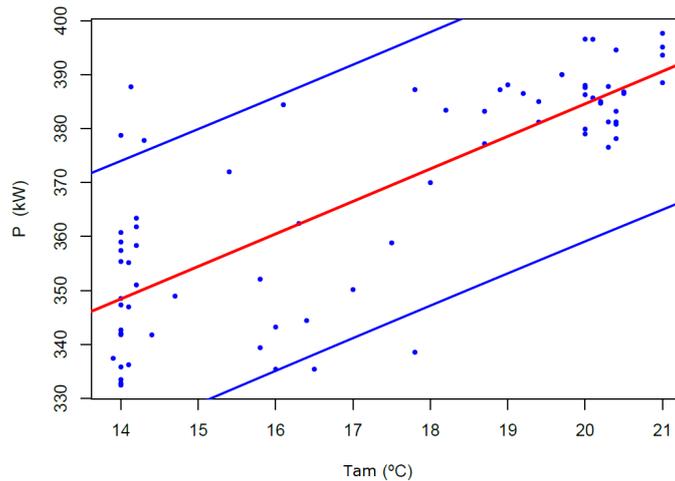


Figura 4.30: Gráfico de dispersión P.E. Viaje n°1. Elaboración propia (2019)

Haremos a continuación el mismo análisis para el resto de viajes distinguiendo los valores de correlación por modos de funcionamiento.

#### 4.3.2. Correlaciones del viaje de Cádiz a Ferrol

En este caso vamos a separar los datos de igual forma por modos de funcionamiento analizando en un primer momento los datos en conjunto de la navegación. Hay que tener presente que por la duración de esta, los intervalos considerados son de 20 minutos en lugar de 1 hora como en el resto de los casos.

Considerando los datos en conjunto, la temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ), medida en los dos puntos posibles de las tomas de mar, arroja una correlación fuerte de 0,91 lo que indica que no es necesario en un cómputo general de datos separar esta en dos para su análisis.

Las correlaciones entre generación de DD.GG. y la  $T_{am}$  son moderadas a fuertes dependiendo en cada caso de los generadores que se encuentran encendidos así, los que más han funcionado en el periodo, son el 2B el 100% del tiempo, con valores fuertes de correlación (0,61) y el 2A que ha funcionado el 50% en modos de P.E. y O. (0,51); los otros, el 1B que ha funcionado el 50% en el modo de C.R. ofrece valores de correlación débiles (0,24), y el 1A no ha trabajado en toda la navegación por lo que no se puede establecer correlación alguna para este motor.

El resto de variables ambientales presenta correlaciones moderadas a débiles con respecto a la  $T_{am}$  y, moderadas a débiles con respecto al consumo eléctrico del buque. Con respecto a la velocidad sobre el agua los datos generales muestran correlaciones fuertes a moderadas tanto en el caso de la  $T_{am}$  (negativas) indicando que subidas de la  $T_{am}$  conllevan bajadas de velocidad, como en el caso de la producción eléctrica (positivas excepto en el caso del DG 2A), indicando las positivas que subidas de velocidad suponen bajadas de producción en este motor, lo que es evidente, pues este motor funcionó en el modo de P.E. y en el de O. donde las velocidades son cero o muy bajas. La figura 4.31 presenta los valores de correlación calculados para las variables consideradas. El código de colores manifiesta la fortaleza de la correlación siendo el color verde intenso el valor de correlación positiva más fuerte y el rojo

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

intenso el valor de la correlación más fuerte negativa, el color amarillo representa los valores débiles de las mismas.

	Tam-pp	Tam-pr	Ta	HR	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa
Tam-pp	1,00	0,91	0,42	0,21	N.A.	0,00	0,53	0,49	-0,23	-0,59
Tam-pr		1,00	0,59	0,10	N.A.	0,24	0,30	0,61	-0,02	-0,45
Ta			1,00	-0,60	N.A.	0,42	-0,13	0,51	0,18	-0,18
HR				1,00	N.A.	-0,02	0,29	0,18	-0,16	0,10
PDG1A					N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
PDG1B						1,00	-0,55	0,68	0,41	0,46
PDG2A							1,00	-0,11	-0,38	-0,62
PDG2B								1,00	0,14	0,15
PT									1,00	0,46
Vsa										1,00

Figura 4.31: Viaje 2: valores de correlación sin modos. Elaboración propia (2019)

Por el contrario, si consideramos el modo separado P.E., observamos que los valores de correlación entre las dos temperaturas de proa y popa es fuerte (0,60), no es tan acusada como en el conjunto de los datos, lo que invita a pensar en la influencia que en este modo de P.E., tiene la combinación de los DD.GG. en la mayor o menor temperatura del agua de mar.

De igual forma, el uso del HVAC es otro elemento que hace que, la carga térmica, influya en la temperatura del agua de mar dependiendo de cual de los enfriadores esté encendido (Véase capítulo 3).

Es evidente que los valores de correlación entre los generadores y las temperaturas del agua de mar son de moderadas a fuerte (0,48 - 0,51) en el caso de la producción de los DD.GG. 2A y 2B y negativas moderadas en el caso del 2B, cuantitativamente el 2B funciona muy poco tiempo en este modo por lo que el valor es correcto si bien debe considerarse su valor absoluto a la hora de interpretar la correlación.

El resto de variables ambientales con respecto a la temperatura del agua de mar y entre ellas mismas, presentan correlaciones muy débiles o inexistentes en la práctica a excepción de la humedad relativa que lo hace en valores positivos de 0,63 fuerte con respecto a la temperatura del agua de popa y moderada de 0,33 con respecto a la de proa.

No existe valor de correlación en la producción eléctrica del D.G. 1A por no usarse en todo el periodo ni tampoco con la  $v_{sa}$  ya que el buque se encuentra en puerto parado. La figura 4.32 presenta los valores segregados por modo de operación P.E.

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

	Tam-pp	Tam-pr	Ta	HR	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa
Tam-pp	1,00	0,60	-0,03	0,61	N.A.	-0,37	0,51	0,46	-0,96	N.A.
Tam-pr		1,00	0,07	0,33	N.A.	-0,37	0,46	0,39	-0,50	N.A.
Ta			1,00	-0,02	N.A.	-0,31	0,43	0,30	-0,07	N.A.
HR				1,00	N.A.	-0,18	0,36	0,48	-0,56	N.A.
PDG1A					N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
PDG1B						1,00	-0,70	-0,37	0,40	N.A.
PDG2A							1,00	0,63	-0,48	N.A.
PDG2B								1,00	-0,40	N.A.
PT									1,00	N.A.
Vsa										N.A.

Figura 4.32: Viaje 2: valores de correlación modo P.E. Elaboración propia (2019)

Analizaremos ahora los datos de modo O. (figura 4.33). La correlación de temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ) en este caso está en valores superiores al del modo crucero, si nos fijamos en los valores de velocidad ( $v_{sa}$ ) en este caso son los más bajos del periodo estudiado, hay que tener presente que aquí tenemos funcionando también la propulsión principal que está aportando carga térmica al medio, tanto atmosférico como marino por su refrigeración y exahustación.

Las correlaciones entre la producción eléctrica y la  $V_{sa}$  son prácticamente inexistentes o débiles en el caso del D.G. 2B, pero esto puede deberse más a que los DD.GG. de la Cámara nº2 en popa, funcionan más tiempo y con más carga que los de la Cámara nº1 en proa donde, curiosamente, la temperatura del agua de mar ( $T_{am-pr}$ ) es algo menor en este periodo.

En este caso las correlaciones entre la producción eléctrica y las temperaturas del agua de mar son moderadas a fuertes, con la misma tendencia que en el caso anterior, los motores que más funcionan en el periodo son los DD.GG. 1B y 2B, con valores de 0,46 a 0,56. El caso del 2A presenta valores negativos por funcionar mucho menos tiempo que el resto y la interpretación puede ser equívoca, debiendo considerarse el valor absoluto de la misma. En este caso las correlaciones ambientales presentan valores fuertes, siendo positivas con la temperatura ambiente, y negativas con la humedad lo cual es perfectamente justificable, ya que subida de temperatura baja la humedad relativa.

De forma general si consideramos un periodo de 24 horas en las horas de la noche la temperatura suele bajar y sube la  $HR$  y viceversa, esto puede verse perfectamente en este periodo de 48 horas del viaje nº 2, en el que los modos se han sucedido de forma correlativa y así, vemos con las correlaciones entre  $T_{am}$  y  $T_a$  y  $HR$ , las dos últimas van intercambiando sus signos y su fortaleza con respecto a la  $T_{am}$ .

Los valores de correlación con respecto a la  $V_{sa}$  de la  $T_{am}$  y la  $V_{sa}$  son fuertes y negativas, que justifica subidas de temperatura con la bajada de velocidad y viceversa, lo que casa con lo afirmado en la condición de P.E. donde la velocidad es 0 y la correlación entre  $T_{am}$  respecto del consumo eléctrico es de moderada a fuerte.

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

	Tam-pp	Tam-pr	Ta	HR	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa
Tam-pp	1,00	0,67	0,66	-0,63	N.A.	0,46	-0,40	0,50	0,37	-0,58
Tam-pr		1,00	0,77	-0,79	N.A.	0,56	-0,47	0,55	0,22	-0,49
Ta			1,00	-0,96	N.A.	0,59	-0,72	0,75	0,23	-0,32
HR				1,00	N.A.	-0,58	0,64	-0,71	-0,35	0,30
PDG1A					N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
PDG1B						1,00	-0,56	0,88	0,00	-0,22
PDG2A							1,00	-0,84	0,01	-0,08
PDG2B								1,00	0,04	-0,11
PT									1,00	-0,02
Vsa										1,00

Figura 4.33: Viaje 2: valores de correlación modo O. Elaboración propia (2019)

Por último analizaremos ahora los valores para el modo de C.R. (figura 4.34). En este modo las temperaturas de agua de mar presentan una correlación casi perfecta igualándose prácticamente. Esto es achacable a la mezcla por el movimiento del buque constante en el seno del fluido.

Con respecto a la producción eléctrica de los DD.GG. Se cumplen las pautas establecidas en el análisis del modo O. En el modo C.R. podemos comprobar como los diésel que funcionan todo el periodo mantienen correlaciones fuertes con respecto a la  $T_{am}$  y, en este caso, también con respecto a la  $T_a$  como ha sucedido en el resto de análisis, pero en este caso es mayor que en el resto.

Las correlaciones ambientales mantienen la línea ya explicada en el caso del modo de operación. Este viaje es el más corto de los estudiados y podemos ver como en un ciclo diario (24 horas) se compensan y aparecen todas las correlaciones positivas, excepto entre  $T_a$  y HR lo que es lógico y se ajusta a lo comentado con anterioridad sobre su comportamiento inverso.

	Tam-pp	Tam-pr	Ta	HR	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa
Tam-pp	1,00	0,95	0,62	0,02	N.A.	0,70	-0,41	0,71	-0,03	-0,23
Tam-pr		1,00	0,63	0,01	N.A.	0,70	-0,47	0,70	0,01	-0,21
Ta			1,00	-0,60	N.A.	0,53	-0,37	0,51	0,02	-0,15
HR				1,00	N.A.	0,13	0,06	0,14	-0,32	0,01
PDG1A					N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
PDG1B						1,00	-0,34	0,95	-0,34	-0,26
PDG2A							1,00	-0,49	-0,08	-0,02
PDG2B								1,00	-0,32	-0,24
PT									1,00	0,36
Vsa										1,00

Figura 4.34: Viaje 2: valores de correlación modo C.R. Elaboración propia (2019)

Al igual que en el modo O., vemos como los valores de correlación, son fuertes con respecto a los diésel generadores (DD.GG.). Hay que tener presente que el caso del motor generador 2A es moderada y negativa, pero este valor debe considerarse en valor absoluto por ser el que menos funciona en este modo y el signo viene dado por la cantidad de ceros que entran en el cálculo.

Para demostrar lo afirmado antes, si calculamos el valor de correlación usando solo

los valores en los que el motor esta en funcionamiento, tenemos que la correlación es débil de 0,12.

Si presentamos los valores de P.E. (figura 4.35) con respecto a la producción eléctrica total ( $PT$ ) y la  $T_{am}$ , vemos que la regresión aproximada ofrece un valor de  $R^2 \approx 0,90$  por lo que el modelo se ajusta bien para la predicción del valor de la variable.

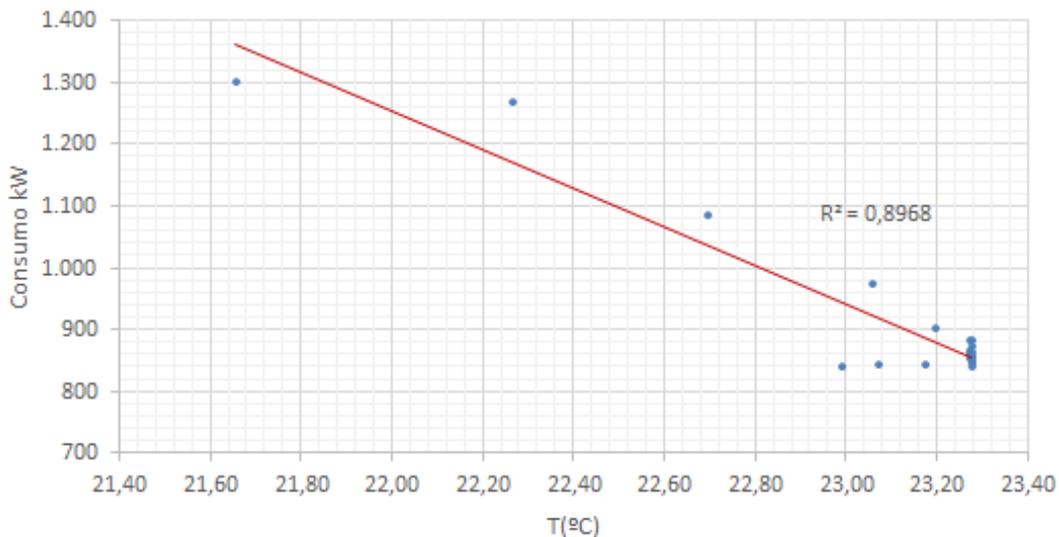


Figura 4.35: Viaje 2: recta de regresión (PT-Tam). Elaboración propia (2019)

### 4.3.3. Correlaciones del viaje a EE.UU.

En este viaje se ha estudiado una base de datos mucho mayor que en los casos anteriores incluyendo distintos modos de operación, en este caso, los modos de P.E., P.A., C.R. y O. En un primer momento hemos analizado las correlaciones para el conjunto de los datos completos y analizado el comportamiento de las correlaciones a lo largo del día, separando los valores en principio según la actividad en puerto y, separando después estos datos en horarios de mañana de 06:00 a 15:00 (laboral) y de tarde a partir de las 15:00 (no laboral). De esta forma, se han obtenido los siguientes resultados:

1. **Correlaciones de los datos completos:** en este caso, la correlación de los datos con respecto a la  $T_{am}$  y el consumo ( $PT$ ) arrojan una correlación moderada de - 0,32 (negativa) que puede interpretarse en valor absoluto por las variaciones que sabemos tienen en las correlaciones los modos de funcionamiento y otras variables ambientales y otras cualitativas, como la actividad de las personas, la combinación de motores que se esté considerando o la toma de corriente de la red terrestre de distribución.

En la figura 4.36 podemos ver los valores de las correlaciones con un código de colores como el caso de las anteriores. Los valores más fuertes presentan un color más intenso del verde (los positivos) y del rojo (los negativos), siendo los amarillos más apagados los coeficientes más débiles como ya hemos explicado con anterioridad.

En la figura 4.36 vemos todas las variables analizadas en este viaje. Podemos

ver que las correlaciones de temperaturas de locales presentan correlaciones fuertes con respecto al resto de locales de máquinas (lo que es evidente) y a la  $T_{am}$  y  $T_a$ . Esto es evidente ya que en ambos medios se emplean en la refrigeración y ventilación de todos los locales de máquinas y, por tanto, la temperatura de estos locales dependerá de los dos fluidos entre los que se encuentra un buque, el agua y el aire.

Las temperaturas de los locales y sus correlaciones no se presentarán desde este momento por quedar aquí demostrado su dependencia de la temperatura del medio atmosférico y marino.

	$T_a$	$T_{am}$	$V_{RV}$	$D_{RV}$	HR	PT	$C_{MP}$	$C_{DG}$	S	$T_{CM1}$	$T_{CM2}$	$T_{DG1}$	$T_{DG2}$	$T_{AUX2}$	$T_{AUX3}$	$T_{AUX4}$
$T_a$	1,00	0,71	-0,23	0,11	-0,49	-0,27	-0,34	-0,35	-0,42	0,68	0,67	0,40	0,58	0,56	0,43	0,61
$T_{am}$		1,00	-0,23	0,03	-0,31	-0,30	-0,36	-0,35	-0,45	0,82	0,75	0,50	0,66	0,53	0,69	0,84
$V_{RV}$			1,00	0,11	0,24	0,44	0,45	0,46	0,54	0,03	0,07	0,23	0,19	-0,20	0,05	-0,01
$D_{RV}$				1,00	-0,08	-0,06	-0,16	-0,09	-0,10	0,08	0,06	0,06	0,15	-0,05	-0,03	0,05
HR					1,00	0,29	0,41	0,29	0,42	-0,17	-0,23	-0,02	-0,20	-0,08	-0,19	-0,16
PT						1,00	0,64	0,94	0,65	-0,08	0,06	0,33	0,15	0,07	0,03	0
$C_{MP}$							1,00	0,73	0,96	-0,13	0,03	0,34	-0,01	0,02	-0,08	-0,05
$C_{DG}$								1,00	0,73	-0,14	0,04	0,35	0,07	0,06	0,03	-0,03
S									1,00	-0,19	-0,04	0,26	-0,05	-0,14	-0,10	-0,11
$T_{CM1}$										1,00	0,83	0,65	0,76	0,49	0,70	0,84
$T_{CM2}$											1,00	0,77	0,83	0,64	0,70	0,86
$T_{DG1}$												1,00	0,63	0,55	0,57	0,7
$T_{DG2}$													1,00	0,50	0,61	0,75
$T_{AUX2}$														1,00	0,24	0,53
$T_{AUX3}$															1,00	0,84
$T_{AUX4}$																1

Figura 4.36: Viaje 3: correlaciones de datos completos. Elaboración propia (2019)

2. **Correlaciones de los datos en horario laboral de 06:00 a 14:00 horas en puerto:** en este caso se separa este periodo para comprobar la influencia de la actividad de la gente entre la hora de levantarse y la comida; durante este periodo se encuentra a bordo la práctica totalidad del personal (200 personas) desarrollando distintas actividades.

Se ha comprobado que las correlaciones de  $T_{am}$  con el resto de variables climáticas y de consumo son débiles positivas (0,10 a 0,20) con respecto al resto de las variables. La referente al consumo es de 0,11 positiva (véase figura 4.37). De todas formas las estancias en puerto con la toma de corriente de tierra pueden desvirtuar el valor final puesto que, al no encontrarse encendidos los DD.GG., la mayor parte de tiempo analizado en este viaje es en P.A. y tendremos que cotejar este resultado con un análisis por modos.

En este viaje los datos de puerto se corresponden con los siguientes tiempos de actividad: uno laboral que comienza a las 06:00 hora local y finaliza tras la comida a las 14:00. El segundo periodo es de tiempo de descanso desde las 15:00 a las 23:00. No hemos considerado las horas de 00:00 a 05:00 en los cálculos por no aportar datos de consumo y por poder falsear las correlaciones como estamos comprobando en este análisis al considerar periodos de inactividad.

	<i>Ta</i>	<i>Tmar</i>	<i>Vrv</i>	<i>Drv</i>	<i>HR</i>	<i>PT</i>	<i>PHVAC</i>
<i>Ta</i>	1,00	0,38	- 0,03	0,05	-0,50	0,12	0,08
<i>Tmar</i>		1,00	- 0,03	-0,20	-0,12	-0,11	- 0,15
<i>Vrv</i>			1,00	0,23	0,04	-0,17	0,03
<i>Drv</i>				1,00	-0,20	-0,04	0,07
<i>HR</i>					1,00	0,14	- 0,15
<i>PT</i>						1,00	0,12
<i>PHVAC</i>							1,00

Figura 4.37: Viaje 3: correlaciones de 06:00 a 14:00 h. Elaboración propia (2019)

3. **Correlaciones en horario libre de 15:00 a 23:00:** en este caso las correlaciones de la  $T_{am}$  son también débiles con respecto a todas las variables excepto en el caso del consumo que es moderada positiva de +0,37 y del orden de la de los datos completos, de todas formas este valor nos confirma la existencia de una correlación entre la  $T_{am}$  y el consumo eléctrico en los modos de puerto apagado (P.A.) si bien, en este modo es menor que el calculado en los viajes n°1 y n°2 para estas condiciones de P.A. En la figura 4.38 podemos ver una tabla codificada de igual forma que las anteriores.

	<i>Ta</i>	<i>Tmar</i>	<i>Vrv</i>	<i>Drv</i>	<i>HR</i>	<i>PT</i>	<i>PHVAC</i>
<i>Ta</i>	1,00	0,40	-0,17	0,02	-0,62	-0,01	-0,19
<i>Tmar</i>		1,00	0,14	-0,28	-0,06	-0,37	-0,20
<i>Vrv</i>			1,00	0,06	0,15	-0,16	0,03
<i>Drv</i>				1,00	-0,22	-0,02	-0,11
<i>HR</i>					1,00	-0,01	0,18
<i>PT</i>						1,00	0,32
<i>PHVAC</i>							1,00

Figura 4.38: Viaje 3: correlaciones de 15:00 a 23:00 h. Elaboración propia (2019)

Debido a la incongruencia con el análisis de los dos primeros viajes n°1 (Ferrol) y n°2 (Cádiz) con respecto a la fortaleza de las correlaciones, procedimos al análisis de los valores de correlación por modos de operación separando estos y, al mismo tiempo, efectuamos una segunda división horaria es decir, considerando en la base de datos las variables agrupadas por hora del día entre las 00:00 y las 23:00 obteniendo así 24 valores de correlación para los valores horarios.

Aquí podemos tener presente otro elemento cualitativo que es el horario desarrollado generalmente en los periodos de mar en este tipo de buques, este consiste en el siguiente reparto del tiempo de actividad de las personas denominado vigilancias; en estos buques trabajan en el mar a tres vigilancias repartidas según el siguiente orden:

1ª vigilancia: 8:00 11:00

2ª vigilancia: 11:00 14:00

3ª vigilancia: 14:00 17:00

1ª vigilancia: 17:00 20:00

2ª vigilancia: 20:00 23:30

3ª vigilancia: 23:30 2:30

1ª vigilancia: 2:30 5:30

2ª vigilancia: 5:30 8:00

3ª vigilancia: 8:00 11:00 y se repite el ciclo.

Con este análisis los valores de correlación que se obtienen son los siguientes:

1. **Datos completos de la navegación:** centrándonos en la temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ) podemos observar un valor de correlación generalizado moderado, oscilando entre 0,48 y 0,11 negativos. Con un valor medio horario de -0,31 moderado para todos los datos. La figura 4.39 muestra los valores alcanzados por las distintas correlaciones analizadas en el viaje.

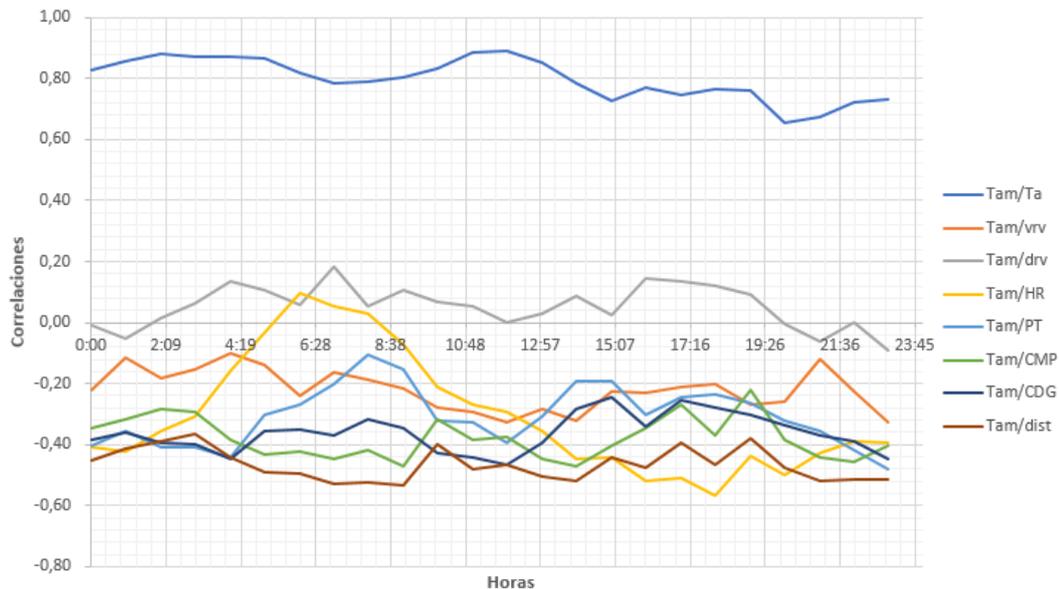


Figura 4.39: Viaje 3: correlaciones completo por horas. Elaboración propia (2019)

2. **Datos en modo P.A.:** en este caso (figura 4.40) la horquilla se amplía y presenta valores de correlación que van desde -0,48 a +0,38 presentando un valor promedio de coeficiente de +0,10 lo que en principio puede despistarnos por ser un valor muy bajo si bien estos valores son moderados.

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

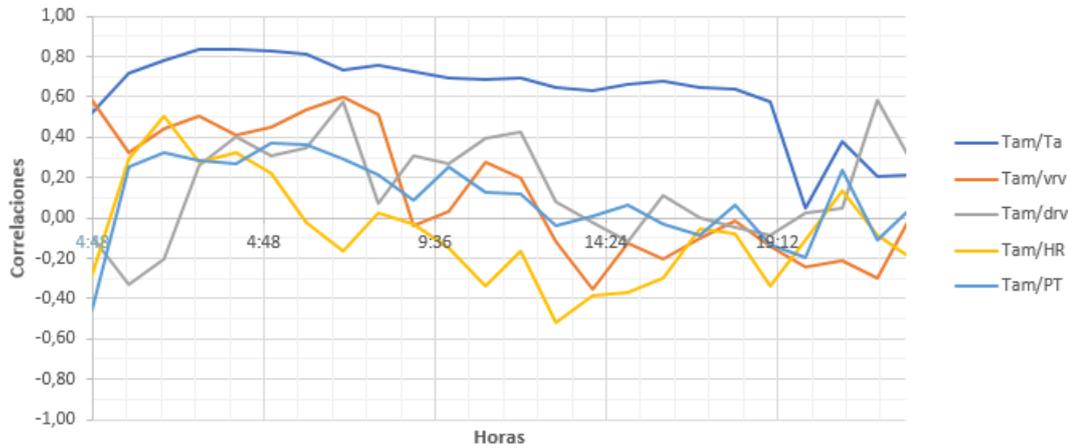


Figura 4.40: Viaje 3: correlaciones de modo puerto (P.A.). Elaboración propia (2019)

3. **Datos de modo P.E.:** aquí confirmamos lo postulado en los dos primeros viajes y, para este modo, se presenta correlaciones casi perfectas en algunas horas, oscilando entre -0,68 y +1. El valor medio de las mismas es +0,28 pero que si consideramos un valor promedio del valor absoluto este es fuerte como se puede ver en los valores alcanzados en el gráfico de la figura 4.41.

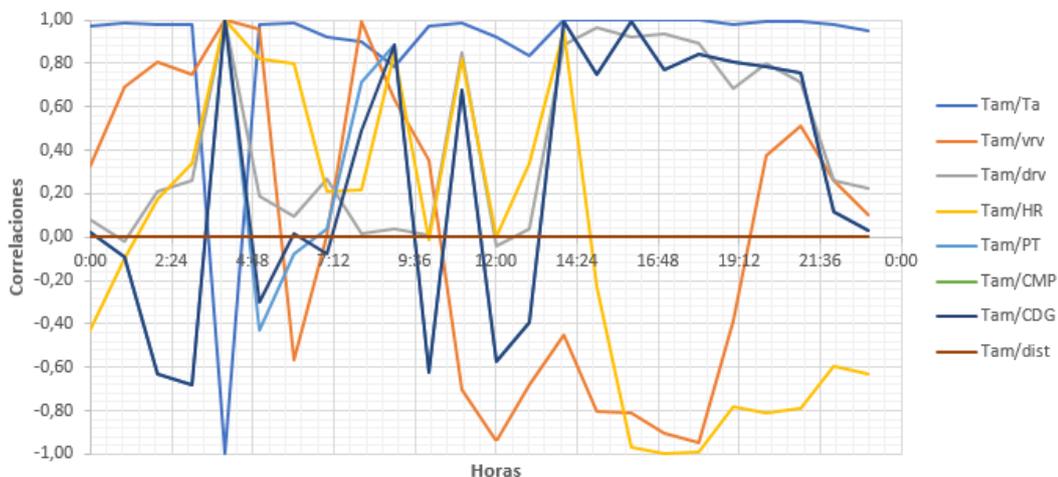


Figura 4.41: Viaje 3: correlaciones de modo puerto (P.E.). Elaboración propia (2019)

4. **Datos de modo C.R.:** en este caso los valores de correlación son moderados a fuertes entre  $T_{am}$  y consumo eléctrico. El valor promedio es de +0,27. En la figura 4.42 podemos ver que si seguimos la actividad de la dotación en sus vigilancias, no se aprecia una pauta reconocible en el comportamiento de las correlaciones. Esto puede ser indicador que el modo crucero se ve poco afectado por la actividad humana.

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

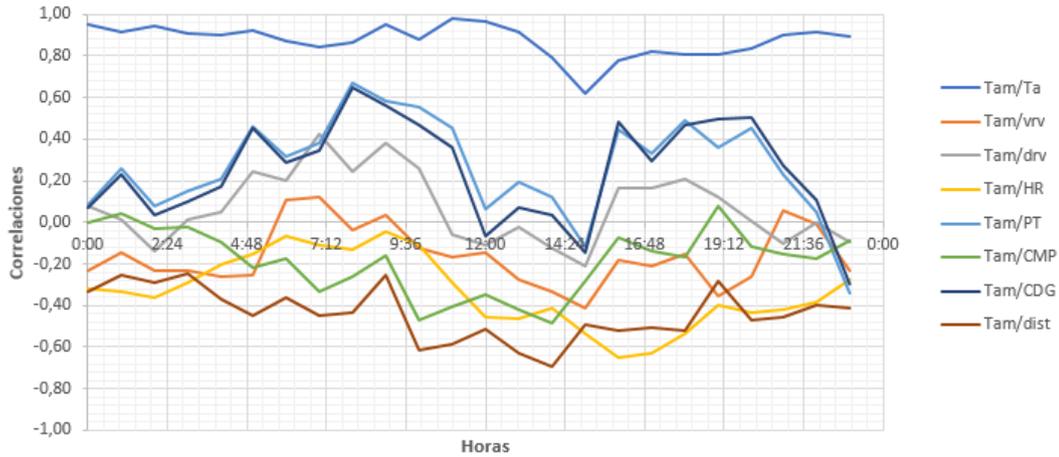


Figura 4.42: Viaje 3: correlaciones en modo crucero (C.R.). Elaboración propia (2019)

5. **Datos de modo O.:** en el modo de operación no se disponen de muchos datos, con la ventaja que se encuentran agrupados en una horquilla horaria de entre 10:00 y 16:00 fundamentalmente así, centrando el análisis en esta horquilla temporal, las correlaciones son fuertes oscilando entre -0,87 y 1 (figura 4.43). Lo que puede casar con los datos de puerto encendido, ya que estas horas fueron las dedicadas al lanzamiento de misiles en el que las velocidades son pequeñas por la necesidad de mantener una posición casi estática para hacerlo (0 a 5 nudos); hay que tener presente en este caso que tenemos la aportación de la carga térmica de los motores principales y turbinas de gas por sus circuitos de refrigeración.

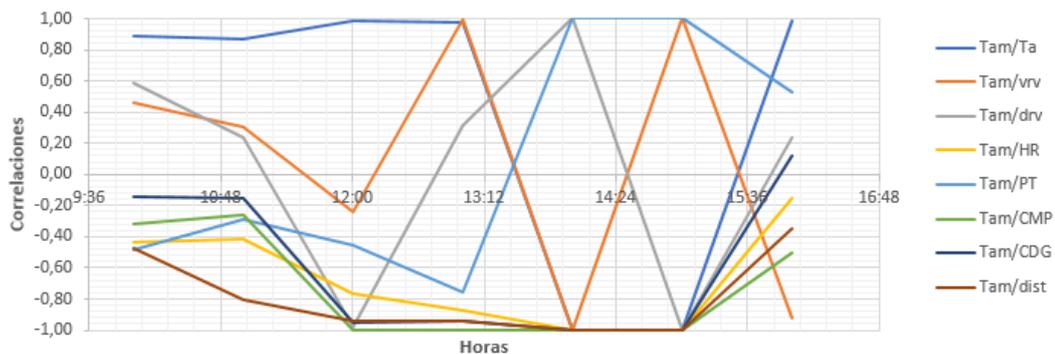


Figura 4.43: Viaje 3: correlaciones en operación (O.). Elaboración propia (2019)

6. **Datos correspondientes al consumo del HVAC:** por último se comprobó la influencia del sistema de climatización (HVAC) en el consumo del buque (figura 4.44), los datos son un muestreo manual de valores tomados directamente en las unidades de enfriado de agua de mar y presenta una correlación de 0,65 (fuerte) positiva fuerte con respecto a *PT* (kW generados/consumidos).

	<i>Ta</i>	<i>Tmar</i>	<i>Vrv</i>	<i>Drv</i>	<i>HR</i>	<i>PT</i>	<i>PHVAC</i>
<i>Ta</i>	1,00	0,66	-0,19	0,13	-0,51	-0,20	-0,08
<i>Tmar</i>		1,00	-0,16	0,07	-0,24	-0,13	-0,01
<i>Vrv</i>			1,00	0,12	0,24	0,44	0,41
<i>Drv</i>				1,00	-0,03	-0,08	0,09
<i>HR</i>					1,00	0,37	0,23
<i>PT</i>						1,00	0,65
<i>PHVAC</i>							1,00

Figura 4.44: Viaje 3: correlaciones del HVAC. Elaboración propia (2019)

Es evidente la influencia de la temperatura del agua de mar en el consumo eléctrico del buque si bien, la gran variabilidad apunta a la necesidad de analizar otras variables como pueden ser las corrientes, la influencia de la velocidad del buque, las mareas y otros elementos como las configuraciones de equipos como el número de enfriadores del HVAC encendidos, la segregación del servicio o no, las plantas de tratamiento de aguas, las potabilizadora, los equipos de cocina, agua sanitaria, sistemas de armas, radares, alumbrado o equipos auxiliares como las bombas encargadas de refrigerar los motores principales o el lubricante de estas por citar algunos ejemplos.

Por otro lado, es fundamental proceder al tratamiento de los datos de forma segregada teniendo presente elementos de tipo cualitativo, por modos de funcionamiento, horarios de actividad de las personas en el buque y el elemento temporal dentro del día. Esto aconseja establecer herramientas del Internet de las cosas (Internet of Things (IoT)) que nos permitan efectuar un análisis en tiempo real de las variables además de dinámico.

Dicho esto, en el consumo final, observamos que las variables climáticas tienen una influencia importante en todos los modos de funcionamiento del buque y deben ser analizadas de una forma dinámica pues la asignación de valores fijos como se ha venido haciendo desde hace años a la hora de diseñar los sistemas energéticos (consumidores ó generadores) no es el mejor de los criterios para el diseño.

Todo ello puede tener una fuerte influencia en el coste del ciclo de vida del sistema buque, y puede hacer que no sea viable prolongar su existencia en momentos de crisis como sucedió con el portaaviones “Príncipe de Asturias” cuando se dio de baja por lo excesivo de su coste de ciclo de vida y mantenimiento.

#### 4.3.4. Correlaciones del viaje a Australia

Analizaremos ahora los valores de las correlaciones obtenidas para el viaje a Australia en el que las cuatro primeras etapas se corresponden con el modo de crucero (C.R.) y la última se corresponde con este mismo modo pero, debemos tener presente que en se han desarrollado distintos ejercicios de entrenamiento en y su modo más apropiado sería el de operación (O.). La última etapa puede ser considerada de O. por la variabilidad que muestra en variables como las de consumo de combustible de la propulsión como se ha explicado en el apartado 4.2.4. De todas formas, salvo esta puntualización, se considerará todo el periodo en el modo (C.R.).

Analizaremos los coeficientes de correlación de cada una de las etapas por separado

para comprobar si estos valores confirman lo ya visto en los viajes anteriores. El disponer de series más largas para el modo de C.R. en distintos escenarios del Globo, nos permitirá analizar el comportamiento de estas correlaciones en zonas distantes y distintas en condiciones climáticas.

Estas cinco etapas han arrojado los siguientes resultados de correlación:

1. **Viaje de Ferrol a Yedda (Arabia Saudí).** En la figura 4.46 podemos ver los valores de las correlaciones de esta etapa a las que se les ha aplicado el mismo código de colores que en el resto de tablas de correlaciones anteriores donde, el color verde o rojo más intenso refiere las correlaciones fuertes o perfectas y el color rojo tiene el mismo significado pero con signo negativo así, el amarillo tenue o el blanco indican correlaciones muy débiles o inexistentes (N.A.).

Las variables, para todas las etapas de este viaje, se han agrupado empleando un código de colores también así tenemos:

- Color naranja: se ha empleado para las potencias en kW de los motores DD.GG. y su suma acumulada en la PT.
- Color gris: para las temperaturas de los locales de motores principales, diésel generadores y locales de equipos auxiliares.
- Color rosa: variables de velocidad y dirección del buque.
- Color azul celeste: para las variables ambientales como temperatura del agua de mar o la dirección del viento.

Analizaremos en primer lugar las variables de potencia de esta etapa. En los valores podemos ver que los motores que más funcionan en la etapa mantienen las correlaciones más altas con la PT. La tabla 4.45 presenta los datos relativos a cada motor y a cada etapa del viaje a Australia. Vemos separados el número total de horas que ha funcionado cada motor y el % sobre el tiempo total para cada una de las etapas consideradas.

	HORAS TOTALES FUNCIÓN	HORAS ENCENDIDO MOTOR 1A	HORAS ENCENDIDO MOTOR 1B	HORAS ENCENDIDO MOTOR 2A	HORAS ENCENDIDO MOTOR 2B	% DE USO 1A	% DE USO 1B	% DE USO 2A	% DE USO 2B
ETAPA 1	505	234	165	34	72	46,34%	32,67%	6,73%	14,26%
ETAPA 2	248	111	1	92	44	44,76%	0,40%	37,10%	17,74%
ETAPA 3	345	147	5	83	110	42,61%	1,45%	24,06%	31,88%
ETAPA 4	338	159	0	14	165	47,04%	0,00%	4,14%	48,82%
ETAPA 5	456	182	7	106	161	39,91%	1,54%	23,25%	35,31%
<b>TOTALES</b>	<b>1892</b>	<b>833</b>	<b>178</b>	<b>329</b>	<b>552</b>	<b>44,03%</b>	<b>9,41%</b>	<b>17,39%</b>	<b>29,18%</b>

Figura 4.45: Viaje 4: uso de los motores DD.GG. Elaboración propia (2019)

En la figura 4.45 podemos ver que los dos motores que más tiempo funcionan son los 1A y 1B que también tienen los valores de correlación más elevados con respecto a PT de 0,35 y 0,37 respectivamente.

Si observamos los valores de correlación entre motores DD.GG., podemos ver que la correlación entre estos son negativas o inexistentes en la práctica, el signo debe interpretarse aquí como una indicación de la proporción de uso y

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

de la mayor o menor carga suministrada así, tomando como ejemplo los motores 1B y 2B, vemos que su coeficiente de correlación es fuerte de -0,60 así, tomando las proporciones de funcionamiento vemos que el 1B funciona el 33% de tiempo y el 2B el 15%; por otro lado tenemos que no funcionan juntos a excepción de 8 horas en el viaje con rangos de potencia muy similares.

Si tomamos ahora los motores 1A y 2A, vemos que su correlación es de -0,46 moderada; en este caso el 2A funciona más horas junto al 1A si bien es el que menos se emplea durante el viaje con cargas similares entre ambos.

Si tomamos las correlaciones presentes entre los que más han funcionado y los que no, vemos que los coeficientes de correlación son débiles a moderados negativos igualmente, lo que confirma las afirmaciones anteriores sobre el signo de la correlación como orientación para saber quien está funcionando en cada momento.

Por último, si tomamos los valores de correlación entre los motores que más funcionan (1A 1B) y los que menos (2A 2B) vemos que estas son inexistentes entre ambas con valores de 0,13 y 0,09 respectivamente.

	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	TAUX2	TAUX3	TAUX4	TDG1	TDG2	TCM1	TCM2	Vsa	Vsf	Rsf	HR	Tam	Ta	VRV	DRV	DRAV
PDG1A	1,00	0,13	-0,46	-0,12	0,35	0,52	0,58	0,51	0,24	0,17	0,17	0,53	0,23	0,21	-0,11	-0,14	0,34	0,40	0,25	0,26	-0,06
PDG1B		1,00	-0,25	-0,60	0,37	0,36	-0,02	-0,24	-0,03	-0,57	-0,33	-0,08	0,34	0,38	-0,16	-0,19	-0,37	-0,23	0,36	0,13	-0,06
PDG2A			1,00	0,09	0,22	0,02	-0,34	-0,22	-0,42	0,28	0,05	-0,13	0,21	0,21	-0,18	-0,11	-0,25	-0,15	-0,11	-0,29	0,06
PDG2B				1,00	0,35	-0,15	0,36	0,55	0,24	0,60	0,41	0,40	-0,28	-0,34	0,29	0,05	0,67	0,59	-0,30	0,05	0,02
PT					1,00	0,59	0,45	0,44	0,07	0,27	0,19	0,54	0,40	0,37	-0,09	-0,31	0,29	0,46	0,19	0,15	-0,04
TAUX2						1,00	0,46	0,32	-0,10	0,07	-0,01	0,44	0,56	0,57	-0,38	-0,32	0,02	0,31	0,44	0,06	-0,12
TAUX3							1,00	0,92	0,46	0,54	0,46	0,81	0,02	-0,01	-0,21	-0,28	0,77	0,79	0,17	0,12	-0,03
TAUX4								1,00	0,55	0,73	0,62	0,89	-0,03	-0,07	-0,08	-0,12	0,91	0,87	0,07	0,18	0,01
TDG1									1,00	0,30	0,57	0,48	-0,21	-0,20	0,07	0,11	0,65	0,56	0,20	0,26	0,25
TDG2										1,00	0,67	0,68	-0,10	-0,15	-0,04	-0,08	0,73	0,66	-0,24	0,00	0,01
TCM1											1,00	0,69	-0,02	-0,04	0,04	-0,04	0,69	0,63	0,01	0,17	0,22
TCM2												1,00	0,21	0,17	-0,13	-0,22	0,77	0,82	0,13	0,23	0,00
Vsa													1,00	0,98	-0,26	-0,21	-0,21	0,02	0,50	0,33	-0,09
Vsf														1,00	-0,28	-0,18	-0,26	-0,02	0,52	0,31	-0,09
Rsf															1,00	0,29	0,18	0,01	-0,26	0,20	-0,02
HR																1,00	0,03	-0,33	-0,09	0,10	0,02
Tam																	1,00	0,84	-0,08	0,21	0,09
Ta																		1,00	0,08	0,17	0,08
VRV																			1,00	0,21	0,08
DRV																				1,00	-0,22
DRAV																					1,00

Figura 4.46: Viaje 4: correlaciones de la etapa 1. Elaboración propia (2019)

Considerando ahora las potencias con el resto de grupos de variables diremos que, en el caso de las temperaturas de los locales de máquinas en color gris, presentan correlaciones de fuertes a moderadas en todos los casos, lo que entra dentro de lo predecible ya que tanto el consumo, como la generación, como el empleo de sistemas auxiliares implica pérdidas de energía que conllevan siempre variaciones en la temperatura.

De igual forma locales adyacentes presentan valores de correlación positiva más altas como en el caso de las cámaras de máquinas de propulsión y las cámaras de diésel generadores. Esta misma situación se ha observado en el resto de etapas del viaje y, por tanto, estos coeficientes no se reflejarán en las tablas que presentemos a continuación para el resto de etapas.

Con respecto a las variables dinámicas de velocidad del buque, presenta correlaciones moderadas (0,3 a 0,4) con respecto a la potencia consumida. Lo que es un indicador que la velocidad va a influir directamente de forma moderada en el consumo eléctrico del buque en el modo C.R.

Con respecto a las condiciones ambientales, vuelve a ser la  $T_{am}$  y  $T_a$  las variables que más afectan al consumo eléctrico del buque con correlaciones moderadas a fuertes que, en el caso de la potencia total, son de 0,3 y 0,46 que si bien, indican la influencia de la  $T_{am}$  y  $T_a$  en el consumo, esto debe llevarnos a considerar que, como se ha hecho en el caso de los valores de correlación para el viaje nº3 a EE.UU., la hora del día va influir en el valor de la correlación al igual que la zona geográfica en un periodo dilatado como este.

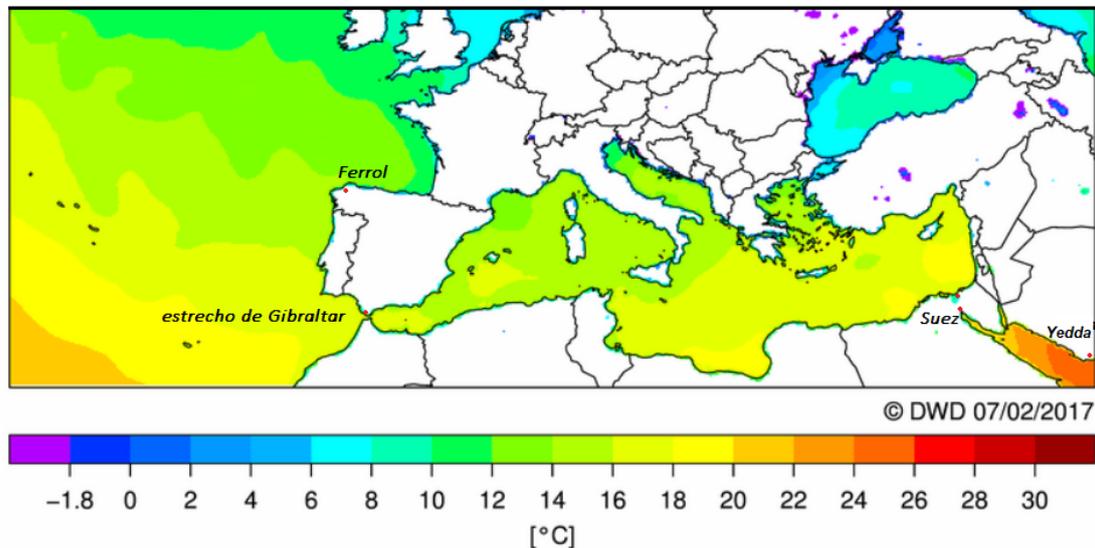


Figura 4.47: Viaje 4: temperatura del mar etapa 1. Agencia DWD (2017)

Lo anterior justifica que, en el caso de la correlación del diésel 2B, con valor de correlación de 0,67 fuerte, esta se debe a las horas a las que ha funcionado y a la zona del Globo donde se ha navegado. En este caso el buque navega de Ferrol a Yedda, en esta etapa se pasa del océano Atlántico al mar Mediterráneo atravesando este hasta el Canal de Suez para pasar al mar Rojo y llegando a Yedda.

Si consideramos el mapa de temperaturas de superficie de la figura 4.47 elaborado con información de la agencia del clima de Alemania <sup>1</sup>, podemos ver que pasamos en ese viaje de zonas de aguas a temperaturas de agua de 13 °C de media en el mes de enero de 2107 en Ferrol a 26 °C de valor medio en Yedda. En esta etapa del viaje el buque pasa por zonas de muy diferente temperatura, en las que el motor 2B funciona en las finales fundamentalmente dentro del mar Rojo, lo que denota la influencia de la navegación en el consumo en zonas de aguas calientes y de ahí su correlación más alta al igual que con la temperatura del aire.

El generador 1A, el que más funciona de los cuatro DD.GG., también presenta correlaciones moderadas con respecto a la  $T_{am}$  y  $T_a$  con valores de 0,34 y 0,40 respectivamente en este periodo.

<sup>1</sup>El mapa se ha editado para incluir los puertos de salida y llegada. Se ha tomado la información del sitio oficial de la agencia del clima alemana DWD para el mes de enero de 2017 publicado en febrero del mismo año como se puede ver en el ©“copyright” de la figura.

El funcionamiento más inconstante de los otros dos motores, hace que sus correlaciones aparezcan como negativas pero con valores moderados negativos, pero esto debe interpretarse más en valor absoluto, confirmando la influencia del agua de mar en el consumo eléctrico del buque.

2. **Viaje de Yedda a Bombay (India).** En la figura 4.48 tenemos reflejados los valores de las correlaciones calculados para esta etapa. En esta etapa y las restantes, las características de temperatura entre locales y consumos y entre las variables ambientales, no se tratarán por quedar constatado que estas están claramente correlacionadas con los consumos, dependiendo del número de sistemas que se encuentren en funcionamiento, de la carga térmica que aporten al ambiente y de las condiciones de temperaturas que se presenten en el medio circundante (agua de mar y aire).

Analizando las variables de potencia, empezaremos por decir que los valores de correlación respecto de la  $T_{am}$  y de la  $T_a$  son muy débiles, siendo en el caso de la  $PT$  de 0,02 y 0,29 respectivamente.

Los diésel generadores que más funcionan son los 1A y 2A que individualmente presentan correlaciones prácticamente inexistentes entre sus potencias y las variables  $T_{am}$  y  $T_a$ . El tercero es el 2B, que presenta el coeficiente de correlación más alto con un valor de 0,13 positivo. Su periodo de funcionamiento es de 48 horas en los primeros momentos de la navegación, es decir, en el periodo en que cruza el sur del mar Rojo para salir al océano Índico.

Esta zona del mar Rojo es la de temperaturas más altas durante todo el año llegando a alcanzarse los 33 °C [207], por ello podemos considerar que este extremo ha influido en la correlación más alta. De todas formas esta correlación no es fuerte y al ser la etapa en modo crucero (C.R.) se confirma lo visto con anterioridad para este, que la  $T_{am}$  no es determinante en el consumo de los motores.

En este viaje las correlaciones más fuertes se presentan entre la  $PT$  y las variables de velocidad  $v_{sa}$ ,  $R_{sf}$  y  $D_{RV}$  con valores de 0,45; 0,62 y 0,56 respectivamente, de igual forma sucede esto con la potencia activa del diésel generador 2B con valores de 0,46; 0,51 y 0,66.

Lo anterior confirma que la combinación de velocidad del buque con el viento han tenido relación con el consumo eléctrico del buque en esta etapa lo que indica cada vez más la necesidad del análisis dinámico de las variables ambientales y de funcionamiento del buque.

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa	Vsf	Rsf	HR	Tam	Ta	VRV	DRV	DRAV
PDG1A	1,00	-0,37	-0,26	-0,36	-0,22	-0,57	-0,29	-0,31	-0,28	-0,06	0,17	-0,21	-0,34	0,08
PDG1B		1,00	0,11	0,16	0,29	0,02	0,03	0,19	0,12	-0,06	0,02	-0,04	0,12	0,07
PDG2A			1,00	-0,57	0,21	0,13	-0,01	0,04	-0,14	-0,10	0,07	0,10	-0,17	0,33
PDG2B				1,00	0,57	0,46	0,24	0,51	0,37	0,13	0,05	0,22	0,66	-0,53
PT					1,00	0,45	0,15	0,62	0,20	0,02	0,29	0,29	0,56	-0,32
Vsa						1,00	0,71	0,59	0,27	0,48	0,10	0,03	0,62	-0,34
Vsf							1,00	0,34	0,35	0,56	-0,09	-0,20	0,36	-0,25
Rsf								1,00	0,42	0,40	0,19	0,25	0,83	-0,15
HR									1,00	-0,01	-0,52	0,30	0,27	-0,03
Tam										1,00	0,30	-0,39	0,43	-0,23
Ta											1,00	-0,15	0,18	-0,13
VRV												1,00	0,12	-0,02
DRV													1,00	-0,54
DRAV														1,00

Figura 4.48: Viaje 4: correlaciones de la etapa 2. Elaboración propia (2019)

- Viaje de Mumbai a Singapur (Singapur).** En la figura 4.49 podemos ver los valores de correlación de esta etapa. Este viaje presenta valores de correlación de la  $PT$  con respecto a la  $T_{am}$  y la  $T_a$  de 0,13 y 0,64 respectivamente. Los diésel generadores que más funcionan en esta etapa son el 1A y el 2B, el 1B prácticamente no funciona y el 2A lo hace algo menos de tiempo que el 2B. El comportamiento de las correlaciones en este viaje es muy similar al de las correlaciones de la segunda etapa con respecto a las variables de velocidad y rumbo del buque, no obteniéndose valores claros de correlación con el resto de variables analizadas.

	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa	Vsf	Rsf	HR	Tam	Ta	VRV	DRV	DRAV
PDG1A	1,00	-0,04	-0,33	-0,21	0,18	0,05	0,00	-0,08	-0,10	-0,15	-0,07	0,08	-0,36	0,16
PDG1B		1,00	0,09	-0,16	0,27	-0,48	-0,49	-0,09	-0,46	-0,34	0,01	-0,17	-0,07	-0,03
PDG2A			1,00	-0,72	0,27	-0,07	-0,06	0,59	0,01	0,19	0,25	-0,04	-0,09	0,05
PDG2B				1,00	0,08	0,17	0,20	-0,27	-0,03	0,06	0,13	0,13	0,41	-0,15
PT					1,00	0,02	0,04	0,53	-0,35	0,13	0,64	0,21	0,10	0,01
Vsa						1,00	0,99	0,18	0,55	0,69	0,27	0,24	-0,03	0,20
Vsf							1,00	0,18	0,52	0,70	0,31	0,25	0,03	0,14
Rsf								1,00	0,20	0,32	0,31	0,20	-0,01	0,11
HR									1,00	0,52	-0,23	-0,09	0,05	0,13
Tam										1,00	0,47	-0,08	0,05	0,09
Ta											1,00	0,09	0,27	-0,09
VRV												1,00	-0,25	0,27
DRV													1,00	-0,61
DRAV														1,00

Figura 4.49: Viaje 4: correlaciones de la etapa 3. Elaboración propia (2019)

- Viaje de Singapur a Perth (Australia).** En la figura 4.50 vemos los valores de correlaciones de esta parte del viaje. En esta etapa la  $PT$  presenta los valores de correlación más altos con respecto a la  $T_{am}$  y la  $T_a$  con valores moderados de 0,31 y 0,43 respectivamente. En este viaje el generador 1B no funciona en ningún momento y los que más funcionan son los 1A y el 2B, el 2A lo hace en una proporción muy pequeña de la etapa.

### 4.3. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa	Vsf	Rsf	HR	Tam	Ta	VRV	DRV	DRAV
PDG1A	1,00	N.A.	-0,73	0,20	0,24	0,30	0,15	0,00	0,07	-0,03	-0,16	-0,04	0,02	-0,07
PDG1B		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
PDG2A			1,00	-0,06	0,45	-0,37	-0,19	-0,05	-0,10	0,23	0,39	-0,13	-0,02	0,07
PDG2B				1,00	0,49	0,35	0,35	-0,18	-0,05	0,17	0,33	-0,19	-0,04	-0,16
PT					1,00	-0,01	0,05	-0,13	-0,06	0,31	0,43	-0,27	-0,02	-0,05
Vsa						1,00	0,94	-0,10	0,23	-0,08	-0,13	0,11	0,11	-0,08
Vsf							1,00	-0,15	0,19	-0,08	0,01	0,10	0,06	0,03
Rsf								1,00	0,22	0,24	-0,05	-0,11	0,68	-0,41
HR									1,00	0,08	-0,39	0,20	0,24	-0,07
Tam										1,00	0,46	-0,30	0,47	-0,36
Ta											1,00	-0,23	0,02	0,01
VRV												1,00	-0,31	0,31
DRV													1,00	-0,67
DRAV														1,00

Figura 4.50: Viaje 4: correlaciones de la etapa 4. Elaboración propia (2019)

El comportamiento del resto de variables no aportan información determinante sobre su influencia en el consumo de los sistemas embarcados por lo que no haremos comentario alguno sobre estas.

5. **Viaje de Perth a Perth / Stirling (Australia).** La figura 4.51 muestra los valores de correlación de la última etapa considerada del cuarto viaje. En esta etapa del viaje las correlaciones son moderadas para los motores 2A (0,39) y 2B (-0,36) siendo las del consumo total  $PT$  de -0,17 con respecto a la  $T_{am}$ .

	PDG1A	PDG1B	PDG2A	PDG2B	PT	Vsa	Vsf	Rsf	HR	Tam	Ta	VRV	DRV	DRAV
PDG1A	1,00	-0,08	-0,82	0,83	0,94	-0,04	0,02	-0,10	-0,04	-0,24	0,02	-0,09	0,10	0,13
PDG1B		1,00	0,03	-0,10	0,11	0,14	0,08	0,06	-0,06	0,11	0,10	0,01	-0,26	-0,01
PDG2A			1,00	-0,95	-0,72	0,04	0,05	0,11	-0,05	0,39	-0,03	0,04	-0,15	-0,13
PDG2B				1,00	0,81	-0,04	-0,04	-0,11	0,05	-0,36	0,05	-0,08	0,15	0,11
PT					1,00	0,00	0,04	-0,06	-0,05	-0,17	0,07	-0,11	0,03	0,09
Vsa						1,00	0,98	-0,12	0,40	0,09	-0,27	0,24	-0,31	-0,05
Vsf							1,00	-0,11	0,37	0,09	-0,23	0,27	-0,25	-0,02
Rsf								1,00	-0,19	-0,04	0,19	-0,02	-0,02	0,61
HR									1,00	0,13	-0,62	0,07	-0,13	-0,19
Tam										1,00	0,28	0,04	0,04	-0,09
Ta											1,00	-0,23	0,30	0,17
VRV												1,00	-0,22	0,01
DRV													1,00	0,03
DRAV														1,00

Figura 4.51: Viaje 4: correlaciones de la etapa 5. Elaboración propia (2019)

El resto de correlaciones no aportan información suficiente que hagan determinante su influencia en el consumo eléctrico del buque.

Visto todo lo anterior debemos tener presente que a la hora de analizar los datos de los distintos viajes que se quieran estudiar, es necesario tener presentes tanto los modos de funcionamiento como la localización del buque, las condiciones ambientales y la forma en la que se utilizan los sistemas de generación de energía, pues se ha comprobado que esta, junto a la hora del día, influirán en la fortaleza de las correlaciones.

## 4.4. Análisis de gráficos de control

Los gráficos de control de procesos se emplean generalmente para conocer el estado de procesos industriales, buscando la detección de variaciones en el mismo que mermen su calidad y así, poder eliminarlos [208]. Los desencadenantes de las variaciones de los procesos pueden ser de dos tipos fundamentales como explicamos en el capítulo 2:

1. **Comunes:** estos son elementos abundantes y de poca entidad y están asociados a la variabilidad natural del proceso.
2. **Asignables:** tienen mayor influencia en la variación del proceso y son escasos y en ocasiones difíciles de detectar.

En nuestro caso, aplicaremos estos gráficos buscando desencadenantes de la variabilidad del proceso que queremos controlar que es el del consumo energético del buque. Aplicaremos cuatro tipos de gráficos por ser de los más utilizados en el control de procesos y tratados en el capítulo de estado del arte:

1. Gráficos de control de Shewhart. Su formulación se encuentra en el punto 2.8.3.
2. Gráficos de control CUSUM. Su formulación se encuentra en el punto 2.8.3.
3. Gráficos de control EWMA. Su formulación se encuentra en el punto 2.8.3.
4. Gráficos de control de MM. Su formulación se encuentra en el punto 2.8.3.

No se han considerado los gráficos de control por atributos por buscar el control de variables cualitativas que, si bien son más sencillas de detectar en procesos industriales como la fabricación de piezas, en nuestro caso no son tan fáciles de aplicar por la complejidad del proceso.

Para los distintos viajes hemos decidido establecer gráficos de control en base a la cantidad de datos de los que disponíamos en cada caso de esta forma, hemos planteado su análisis de la siguiente modo:

1. En el viaje de prueba en Ferrol (nº1) <sup>2</sup> en aguas de las costas gallegas, hemos considerado un análisis de los datos completos sin tener presente el modo de operación por no tener datos suficientes para el análisis en cada uno de los modos. Tendremos presente que en este caso se han tomado datos cada hora.
2. En el viaje de tránsito de Cádiz (nº 2) a Ferrol, se han considerado periodos de ocho horas sin tener presentes los modos, si bien, la mayoría de los datos se corresponden con los modos de C.R. y O. y esto nos puede dar una visión aproximada de estos. La toma de datos se realizó cada 20 minutos en este caso.
3. En el viaje a EE.UU. (nº3) y retorno a Ferrol, se presentan muchas más condiciones siendo la P.A. la que más destaca junto a la de C.R. La toma de datos en este caso se efectuó cada hora.

<sup>2</sup>Esta numeración correlativa, se hace para referir los viajes y, en ocasiones, nos referiremos a esta numeración asociada a cada viaje como nº 1, nº 2, nº3 ó nº 4.

4. En el viaje a Australia (nº4), se analiza de forma profunda la condición de crucero. La toma de datos se ha hecho como en el caso de los viajes 1 y 3 cada hora.

Analizaremos a continuación como en las secciones anteriores cada uno de los viajes estableciendo comparaciones entre los mismos, considerando los modos de operación siempre que la cantidad de los datos nos lo permita para evitar sesgos indeseados [209] y definiremos criterios de control [210] además, buscaremos causas y comportamientos del buque que permitan, desde los gráficos de control, conocer el estado de funcionamiento del mismo. De forma general, para determinar si los datos de consumo en cada conjunto de datos están fuera de control estadístico consideraremos que:

1. Existe un punto fuera de los límites de control. Por encima de  $3\sigma$  superior o por debajo de  $-3\sigma$
2. Existe una serie de 8 puntos seguidos por encima o por debajo del valor promedio  $\mu_0$ .
3. Existen 5 puntos consecutivos en forma ascendente o descendente.
4. Existen 14 puntos alternando en forma consecutiva arriba y abajo en la zona entre  $\sigma$  y  $2\sigma$  superior o inferior  $-\sigma$  y  $-2\sigma$ .
5. Existen dos puntos consecutivos muy próximos a los límites de control del proceso entre  $2\sigma$  y  $3\sigma$  superior y  $-2\sigma$  y  $-3\sigma$  inferior.
6. Existen 5 puntos consecutivos en la zona comprendida entre  $\sigma$  y  $2\sigma$  superior o  $\sigma$  y  $2\sigma$  inferior
7. Existen 15 puntos consecutivos oscilando en la zona comprendida entre  $\pm\sigma$
8. Existen 8 puntos consecutivos que no caigan en la zona  $\pm\sigma$ .

En nuestro caso, como ya hemos dicho, nos interesa más ver cambios de tendencia o posibles repeticiones de puntos fuera de control que permitan detectar elementos como el modo de operación, la actividad humana o la zona del Globo en la que navega el buque por poner algunos ejemplos.

#### 4.4.1. Gráficos de control del viaje de prueba en Ferrol

En el caso del viaje nº1 de prueba, hemos tomado todos los datos en conjunto al no tener valores suficientes para construir gráficos de control fiables para comprobar el comportamiento de estos. Los resultados que arrojan las gráficos de control son los que podemos ver en este apartado.

La figura 4.52 presenta un gráfico de tipo Shewhart de rangos (R). El gráfico muestra un proceso dentro de control manteniendo los valores próximos a la  $\mu_0 = 255,10$  siendo los límites superior e inferior  $LCS = 394,90$  y  $LCI = 115,31$  del mismo. Entre las 07:00 de la mañana y las 11:00 horas, que se corresponden con los valores de horas 20 a 24<sup>3</sup>, se produce un desplazamiento y cambio de tendencia.

<sup>3</sup>La toma de datos se hace entre las 12:00 del mediodía y las 12:00 del mediodía siguiente.

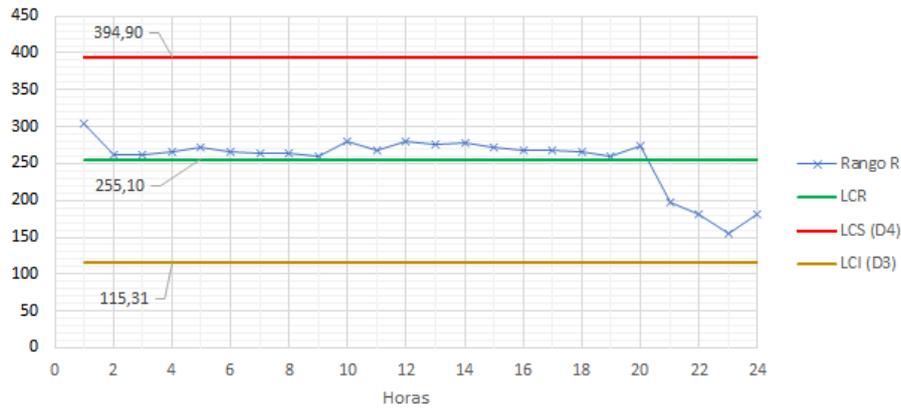


Figura 4.52: Gráfica de control de rangos (viaje 1). Elaboración propia (2019)

La figura 4.53 presenta el gráfico de Shewhart con valores de medias  $\bar{X}$ . En este caso la variabilidad es más acusada. Se comprueba un cambio de tendencia entre las horas 20 y 24 saliendo de control. Los valores de referencia son  $\mu_0 = 319,82$  y para los límites de control  $LCS = 359,87$  y  $LCI = 279,77$ . Valores que se consideran en principio bajos si tenemos presentes los valores de consumo estimados en el balance eléctrico del buque que refiere un valor medio de las condiciones de 1.987 kW (véase capítulo 3 cuadro 3.2).

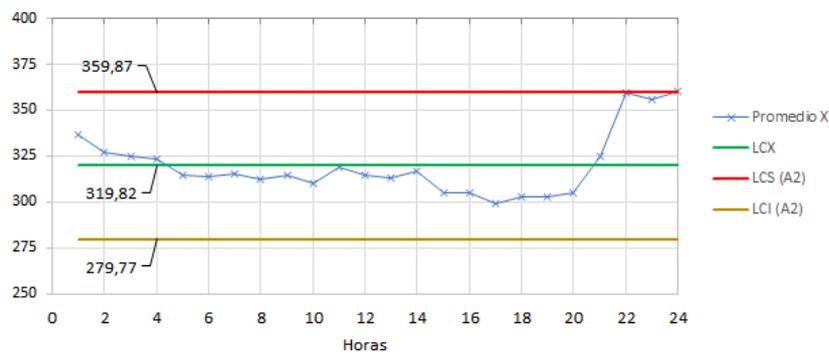


Figura 4.53: Gráfica de control de medias (viaje 1). Elaboración propia (2019)

La figura 4.54 presenta el gráfico tipo EWMA correspondiente al primer viaje. Este gráfico con memoria muestra un proceso bajo control si bien se percibe también el cambio de tendencia a partir de la hora 20 (correspondiente a las 07:00 de la mañana). Los valores se han adimensionalizado para la construcción de estos gráficos considerando un factor de 100, de esta forma se aplican los valores siguientes para  $\lambda = 0,3$ ; el valor de  $K$  que oscila entre 1 y 3 se considera  $K = 3$  cuando consideramos  $3\sigma$ ; el objetivo  $\mu_0 = 319,8$  kW y  $\sigma = 1$ . Los límites de control se estabilizan en  $LCS = 409,8$  y  $LCI = 229,8$ .

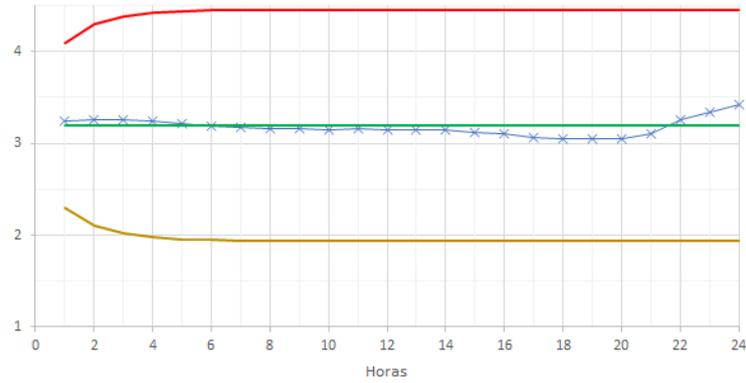


Figura 4.54: Gráfica de control tipo EWMA (viaje 1). Elaboración propia (2019)

La figura 4.55 presenta los valores del gráfico tipo CUSUM del primer viaje. Este es otro gráfico con memoria que permite la detección de cambios muy pequeños. Como se puede comprobar este muestra un proceso bajo control en los valores de  $C_i^+$  y  $C_i^-$ . En este caso también se han adimensionalizado los valores de consumo con factor 100 considerando  $\mu_0 = 3,198$ ;  $\delta = 1$ ;  $K = \delta/2 = 0,5$  y valores de  $H = +5$  y  $h = -5$  en los límites. La escala del proceso no permite efectuar inferencia alguna sobre el mismo.

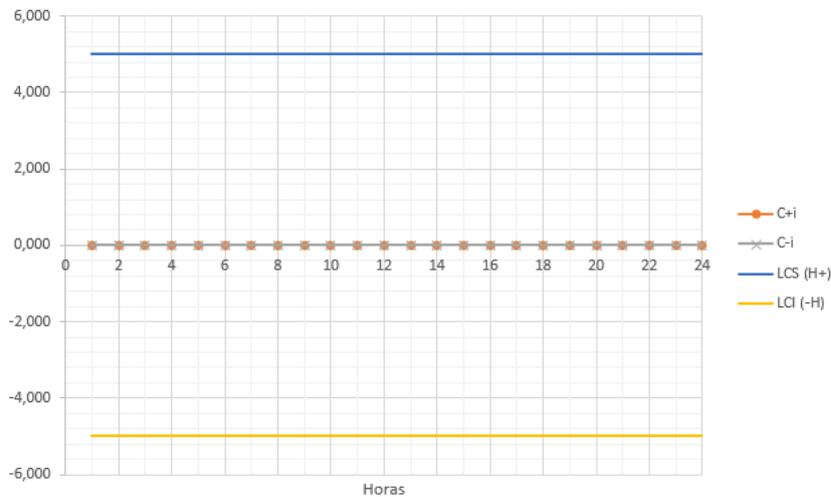


Figura 4.55: Gráfica de control tipo CUSUM (viaje 1). Elaboración propia (2019)

La figura 4.56 complementa el gráfico CUSUM para el primer viaje y representa los valores de sumas acumuladas apreciándose de forma clara el cambio de tendencia en la hora 20.

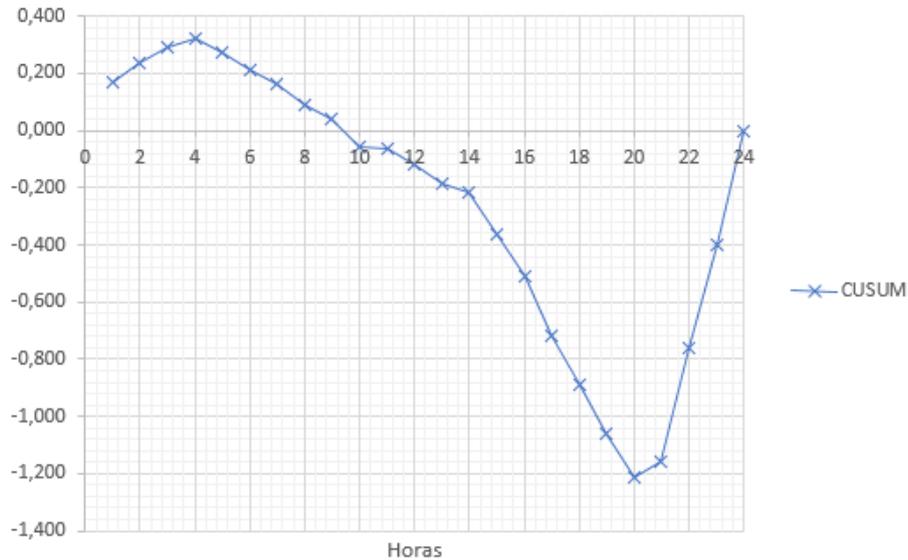


Figura 4.56: Gráfica de control tipo CUSUM (2) (viaje 1). Elaboración propia (2019)

Por último, la figura 4.57 presenta los valores del gráfico de media móvil para el primer viaje de prueba CUSUM. Este gráfico presenta un proceso dentro de control en todo momento aunque, de igual forma que en los anteriores, se observa un cambio de tendencia en la hora 20. En este caso no se han adimensionalizado los valores y se han tomado el valor medio de las medias móviles  $\mu_0 = 320$ ;  $\sigma = 100$ ; el valor de intervalo será  $\omega = 6$  y el valor de  $n = 1$ .

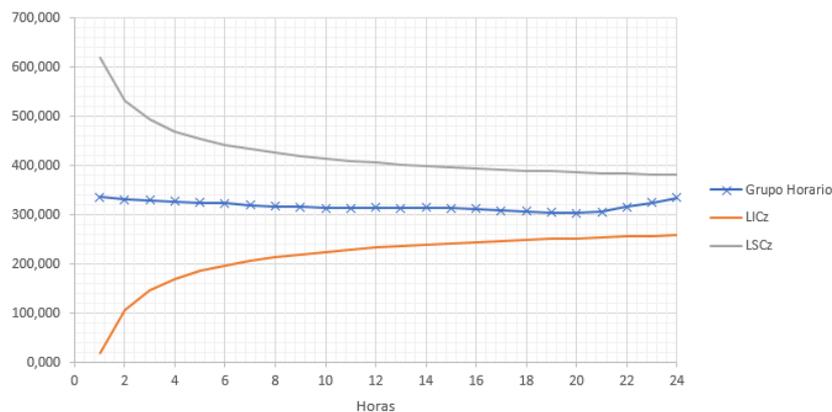


Figura 4.57: Gráfica de control de Media móvil (viaje 1). Elaboración propia (2019)

Estos gráficos de control para este primer viaje no aportan gran información sobre el conjunto de los datos de este viaje de prueba. Vemos que en general el proceso está bajo control pero todo parece aconsejar aplicar un análisis de los datos separados por modos de funcionamiento, por lo que vamos a analizar, en el resto de viajes, los valores de forma separada según modos.

#### 4.4.2. Gráficos de control del viaje de Cádiz a Ferrol

En este viaje hemos agrupado los datos en grupos de 8 horas, el número de datos es reducido y se corresponde con un periodo de 48 horas de funcionamiento básicamente en los modos de P.E. y C.R. En principio hemos tratado los datos en su conjunto sin separar los modos de operación del buque obteniendo los siguientes gráficos que podemos comparar con los del viaje 1. En la figura 4.58 podemos ver el gráfico de control de rangos (R) para el segundo viaje. El gráfico de rangos (R) muestra mayor variabilidad que en el primer viaje, con límites de control  $LCS = 711,27$  kW y  $LCI = 207,68$  kW siendo el valor de referencia  $\mu_0 = 459,48$  kW.

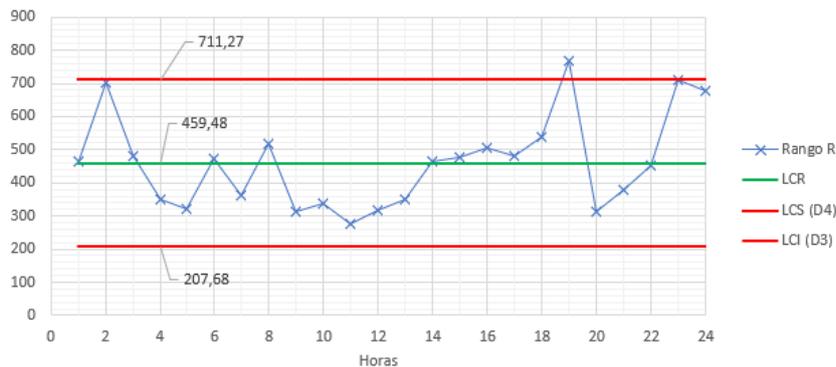


Figura 4.58: Gráfica de control de rangos (viaje 2). Elaboración propia (2019)

El gráfico de medias  $\bar{X}$  en la figura 4.59 muestra un comportamiento similar al anterior. Los valores de referencia y de los límites son:  $\mu_0 = 1,084,58$ ;  $LCS = 1,156,71$  y  $LCI = 1,012,44$  kW. Hay que tener presente que en este caso el buque pasa por cuatro modos de operación (P.E., O., C.R y P.A.). En este caso la toma de datos comienza a las 00:00 y termina 48 horas después a la misma hora. El intervalo es de 20 minutos para cada toma de datos de esta forma, el agruparlo en periodos de 8 horas hace que en cada muestra se junten valores de distintas horas así, por ejemplo, en la hora 1 se juntan los valores de 00:00, 08:00 y 16:00 de los dos días y en el valor de hora 24 están 07:40, 15:40 y 23:40. De esta forma, se entremezclan datos de distintos modos con distintas horas del día como en el caso del primer viaje. Esta puede ser la razón por la que presenta mayor variabilidad.

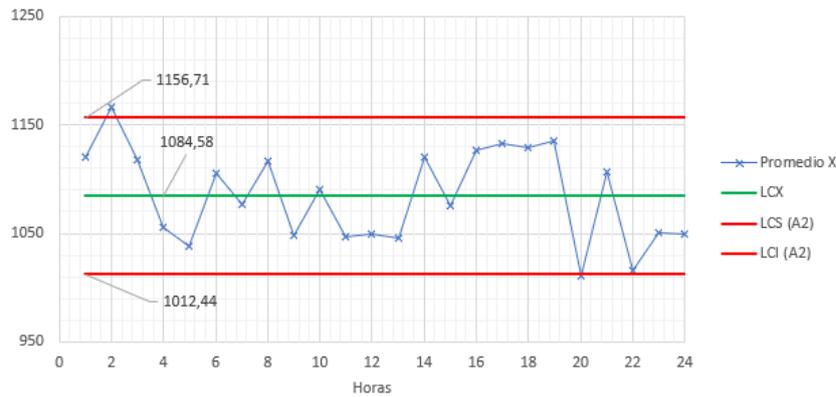


Figura 4.59: Gráfica de control de medias (viaje 2). Elaboración propia (2019)

El gráfico EWMA (con memoria) de la figura 4.60 muestra un proceso dentro de control en el que se repiten las tendencias del gráfico de control de medias  $\bar{X}$ . Mantiene los límites y valor promedio estables a partir de  $\mu_0 = 1,084,6$ ;  $LCS = 1,174,6$  y  $LCI = 994,6$  kW. Estos valores son superiores a los calculados para el viaje n°1, manteniendo valores por debajo de los calculados en el diseño para las SCE, que tienen de valor promedio 1.987 kW. Teniendo presente la referida tabla 3.2, podemos ver que en todos los casos está por encima de cualquiera de las condiciones, incluida la de puerto, en la que considera valores con margen de crecimiento de 988 y 1.084 kW (para verano e invierno respectivamente).

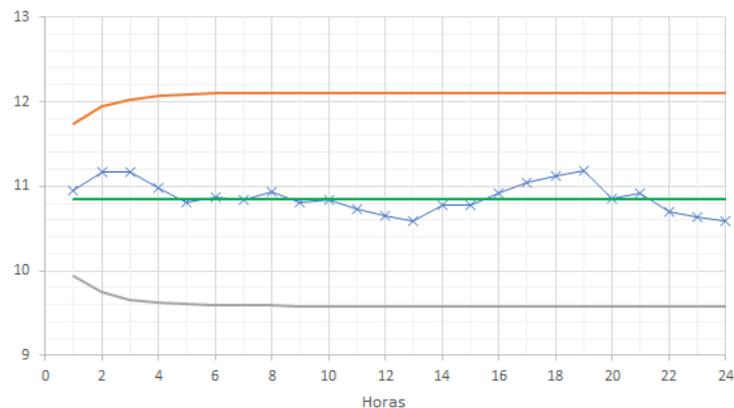


Figura 4.60: Gráfica de control EWMA (viaje 2). Elaboración propia (2019)

La figura 4.61 presenta el gráfico de control CUSUM para el segundo viaje. En el sí se detecta la variabilidad del proceso a diferencia del viaje n°1 de prueba. De todas formas a simple vista presentan un proceso bajo control en todo momento con cambios de tendencia en el margen superior y apenas marcados en el margen inferior  $C_i^+$  y  $C_i^-$ . La figura 4.62 muestra dos cambios de tendencia que en los grupo de datos horarios 2, 1 y 19.

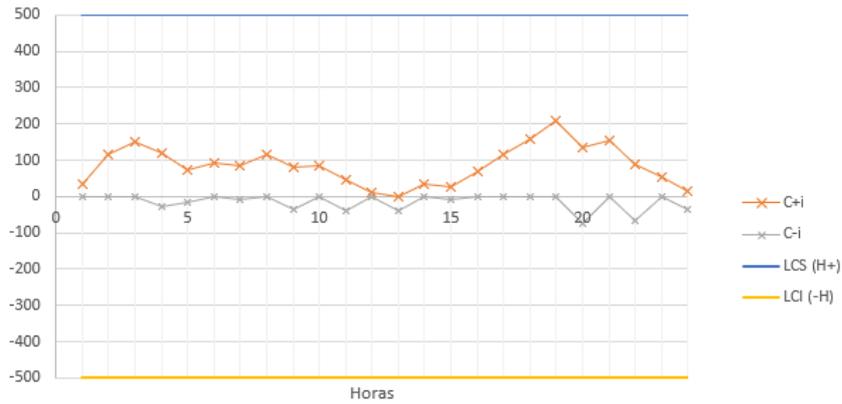


Figura 4.61: Gráfica de CUSUM (viaje 2). Elaboración propia (2019)

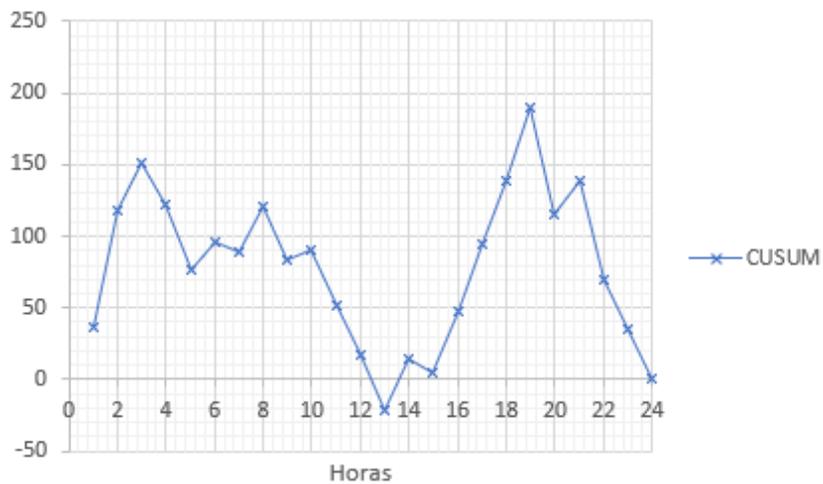


Figura 4.62: Gráfica de control CUSUM 2 (viaje 2). Elaboración propia (2019)

El gráfico de medias móviles de la figura 4.63 muestra un proceso estable bajo control en el que la tendencia del conjunto de datos se muestra similar al comportamiento de los datos del viaje n°1, en el cual el valor medio se mantiene en 1.085 kW con tendencia a valores máximo y mínimo de 1.342 y 831 kW.

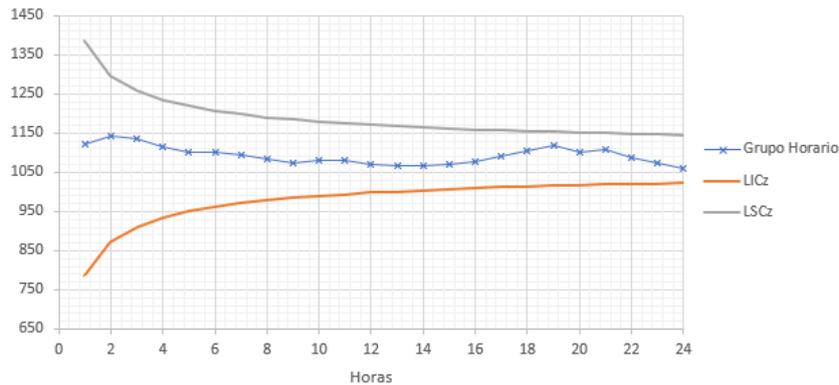


Figura 4.63: Gráfica de control de Media móvil (viaje 2). Elaboración propia (2019)

Si construimos dos tablas con los dos primeros viajes, podemos ver que los valores obtenidos de consumo no se ajustan a los calculados para cada una de las situaciones de carga eléctrica del buque SCE definidas en el diseño y que podemos ver en la tabla 3.2.

Para el caso del viaje nº1 de prueba obtenemos la tabla resumen 4.3 en la que podemos ver que el valor objetivo  $\mu_0$  se encuentra en 320 kW con los límites inferior y superior que podemos ver reflejados en el mismo cuadro. El valor dado en los límites de las medias móviles son valores de asíntota, es decir el valores estabilizados límite.

Límites	$\bar{R}$	$\bar{X}$	EWMA	CUSUM	MM
LCS	395	360	410	+5	582
$\mu_0$	255	320	320	320	320
LCI	115	280	230	-5	257

Cuadro 4.3: Viaje 1 resumen de los gráficos de control. Elaboración propia (2019)

Los valores del viaje nº2 están representados en el cuadro 4.4 en el que podemos ver que el valor objetivo  $\mu_0$  es de 1.085 kW con los valores de límites inferior y superior representados en la misma.

Límites	$\bar{R}$	$\bar{X}$	EWMA	CUSUM	MM
LCS	711	1.157	1.174	+5	1.342
$\mu_0$	460	1.085	1.085	1.085	1.085
LCI	208	1.012	995	-5	831

Cuadro 4.4: Viaje 2 resumen de los gráficos de control. Elaboración propia (2019)

A la vista de los datos podemos decir que en ambos viajes estamos por debajo del valor medio de consumo calculado en el diseño para el buque de 1.987 kW. En el caso del primero de los viajes analizados estamos muy por debajo del consumo medio calculado para una combinación de modos de operación. En el segundo nos encontramos, considerando los valores máximos, en un entorno del 55% del consumo estimado si asumimos un valor medio de los modos de operación, esto nos indica que los estudios estáticos no aproximan de una forma correcta el resultado real de consumo de este tipo de buques.

### 4.4.3. Gráficos de control de los viajes de EE.UU. y Australia

Veremos a continuación el comportamiento de los consumos en los gráficos de control que construimos para los viajes nº3 y nº4. En este caso analizaremos los modos de operación en cada uno de ellos y comparamos los resultados obtenidos de forma conjunta.

Se han tomado datos completos en periodos de 24 horas comenzando a las 13:00 y finalizando 24 horas después. Así, veremos representados en el eje de abscisas el valor 1 que se corresponde en todos los gráficos con las 13:00, el 2 con las 14:00 y así sucesivamente hasta llegar al valor de la hora 24.

Se han separado los datos por modos de operación, analizando los modos de C.R., O., P.E. y P.A. que son los modos de los que se han recogido datos suficiente. Quedan fuera de este análisis los modos de emergencia (E.) y fondeado (F.).

Se elaboran gráficos de control para estos viajes nº 3 y nº 4 al igual que se ha hecho con los dos primeros y hemos representado todos ellos de forma conjunta en las figuras 4.64, 4.65, 4.66, 4.67, 4.68 y 4.69 en las que están representados a la izquierda las cinco etapas de viaje nº4 (todas en modo C.R.) y en la derecha los cuatro modos analizados en el viaje nº3 en C.R.(un tránsito de ida y uno de vuelta), en O., en P.E. y en P.A. ordenados de arriba abajo.

Las etapas marcadas con los números 1 a 5 se corresponden con los tránsitos de Ferrol a Yedda; Yedda a Mumbay; Mumbay a Singapur; Singapur a Perth y Perth Stirling. Por otro lado gráficos del viaje nº 3 se corresponden de arriba abajo con el tránsito a EE.UU.; tránsito de regreso a España; operaciones en EE.UU. de lanzamiento de misiles; estancia en puerto encendido y estancia en puerto apagado. Para todos los modos analizados se han tomado 24 muestras ( $n = 24$ ) con los siguientes tamaños de muestra:

- Para los gráficos de rangos y medias ( $\bar{R}$  y  $\bar{X}$ ) a Australia 10 valores en la etapa 1; 5 para la etapa 2; 7 para las etapas 3 y 4 y, 11 para la número 5.
- Para los gráficos de rangos y medias ( $\bar{R}$  y  $\bar{X}$ ) a EE.UU. 9 valores para el tránsito a EE.UU.; 8 para el tránsito de regreso a España; 10 para las operaciones, 12 para la condición de P.A. y 5 para la condición de P.E.

Partiendo de los valores de los gráficos anteriores de  $\bar{X}$  hemos elaborado el resto de gráficos EWMA y CUSUM, adimensionalizando el valor de medias dividiendo por cien  $\frac{\bar{x}_i}{100}$  con la finalidad de comprobar el comportamiento en un intervalo de valores reducidos.

Hemos considerado para los gráficos EWMA valores de  $\lambda = 0,3$  con  $\pm 3\sigma$  y  $K = 3$ ; para los gráficos CUSUM se han tomado los valores recomendados de  $H = 5$  con valor de  $\delta = 1$  y  $K = \frac{\delta}{2}$ ; en el caso de los gráficos de medias móviles se asumen valores  $\sigma = 100$ , intervalo de media (horas consideradas)  $\omega = 6$  y valor de  $n = 1$ . Las representaciones gráficas emplean los siguientes códigos de colores para los límites y datos calculados:

- Para los gráficos  $\bar{R}$  y  $\bar{X}$  la variable va en azul y los LCS y LCI en rojo, con valor esperado  $\mu_0$  en verde.
- Los gráficos EWMA representan la variable en azul el valor de  $\mu_0$  en amarillo y los LCS, LCI en naranja y gris respectivamente; de igual forma se hace en los gráficos de medias móviles.

- Los gráficos CUSUM emplean el azul para la variable en los gráficos de tendencia y en los CUSUM de límites se emplean el azul para el LCS, el amarillo para el LCI y para las variables  $C_i^+$  el color naranja y el gris para el  $C_i^-$ .

El cuadro 4.5 muestra los valores numéricos calculados para los límites de control superior e inferior  $LCS$ ,  $LCI$  y valor de línea central o esperado  $\mu_0$ ; todos ellos en kW.

Viaje	Límites	$\bar{R}$	$\bar{X}$	$EWMA$	$CUSUM$	$MM$
E.1 V.4	LCS	1.229	1.185	1.160	1.534	1.094
	$\mu_0$	794	1.034	1.034	1.034	1.034
	LCI	386	909	908	534	972
E.2 V.4	LCS	643	1.265	1.326	1.700	1.261
	$\mu_0$	415	1.200	1.200	1.200	1.200
	LCI	188	1.135	1.074	700	1.139
E.3 V.4	LCS	355	1.190	1.280	1.654	1.215
	$\mu_0$	230	1.154	1.154	1.154	1.154
	LCI	104	1.118	1.028	654	1.071
E.4 V.4	LCS	279	1.188	1.287	1.661	1.222
	$\mu_0$	180	1.161	1.161	1.161	1.161
	LCI	81	1.132	1.035	661	1.099
E.5 V.4	LCS	1.202	1.134	1.138	1.512	1.073
	$\mu_0$	777	1.012	1.012	1.012	1.021
	LCI	351	890	886	512	951
T.USA	LCS	994	1.319	1.343	1.718	1.279
	$\mu_0$	642	1.218	1.218	1.218	1.218
	LCI	290	1.117	1.092	718	1.176
T. ESP	LCS	248	1.129	1.194	1.604	1.165
	$\mu_0$	160	1.104	1.104	1.104	1.104
	LCI	72	1.079	1.014	604	1.121
O. USA	LCS	749	1.265	1.315	1.689	1.251
	$\mu_0$	484	1.189	1.189	1.189	1.189
	LCI	219	1.113	1.063	689	1.128
P.E. USA	LCS	855	882	921	1.296	857
	$\mu_0$	552	796	796	796	796
	LCI	250	709	670	296	734
P.A. USA	LCS	495	600	586	1.049	611
	$\mu_0$	320	549	549	549	549
	LCI	144	499	423	49	543

Cuadro 4.5: Viajes 3 y 4: resumen de valores límite. Elaboración propia (2019)

En esta aparecen los viajes a Australia y después los del viaje a EE.UU. Para los viajes a Australia en los acrónimos la letra E significa etapa, y V. 4 hace referencia al viaje nº 4 a Australia, estas cinco etapas fueron en modo crucero (C.R.); los dos siguientes son dos tránsitos de ida y vuelta a EE.UU. designados como T. USA (tránsito de ida) y T. ESP (tránsito de vuelta a España); los tres restantes son cada uno de los modos de operación (O. USA), puerto encendido (P.E. USA) y puerto apagado (P.A. USA) analizados en el viaje nº 3 a EE.UU.

**Gráficos de rangos (R)**

La figura 4.64 muestra el conjunto de los gráficos de control de rangos ( $\bar{R}$ ) de los viajes n° 3 y n° 4 representándose a la izquierda el viaje n°4 a Australia y en la derecha el viaje n°3 a EE.UU. y regreso.

Los gráficos de rangos  $\bar{R}$  debemos analizarlos sin perder de vista los gráficos de medias  $\bar{X}$ . En nuestro caso vemos que, excepto el gráfico de P.E. en EE.UU., todos ellos presentan puntos fuera de control por encima del LCS generalmente. Los cinco primeros gráficos de la columna de la izquierda y los dos primeros por arriba en la columna de la derecha, son viajes en modo crucero (C.R.). EL modo de operación (O.) y las dos condiciones de puerto son respectivamente, el tercero de la columna de la derecha y los cuarto y quinto de la misma columna.

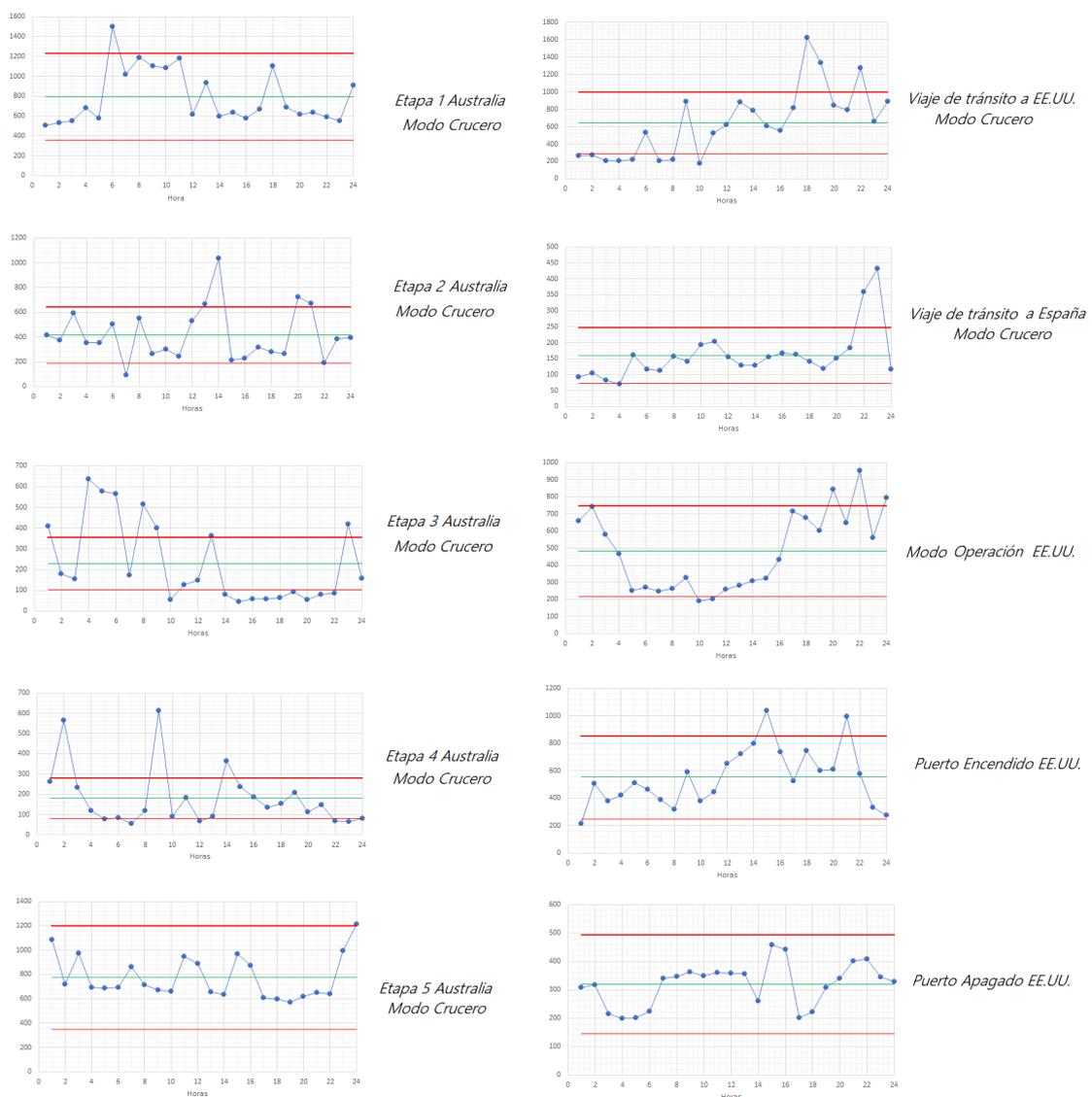


Figura 4.64: Viajes 3 y 4: gráficos de rangos. Elaboración propia (2019)

**Gráficos de medias ( $\bar{X}$ )**

La figura 4.65 muestra el conjunto de los gráficos de control de medias ( $\bar{X}$ ) de los viajes n° 3 y n° 4 representándose a la izquierda el viaje n°4 a Australia y a la derecha a los del viaje n°3 a EE.UU. y regreso. Los gráficos de medias presentan una situación fuera de control generalizada en todos los modos y viajes analizados.

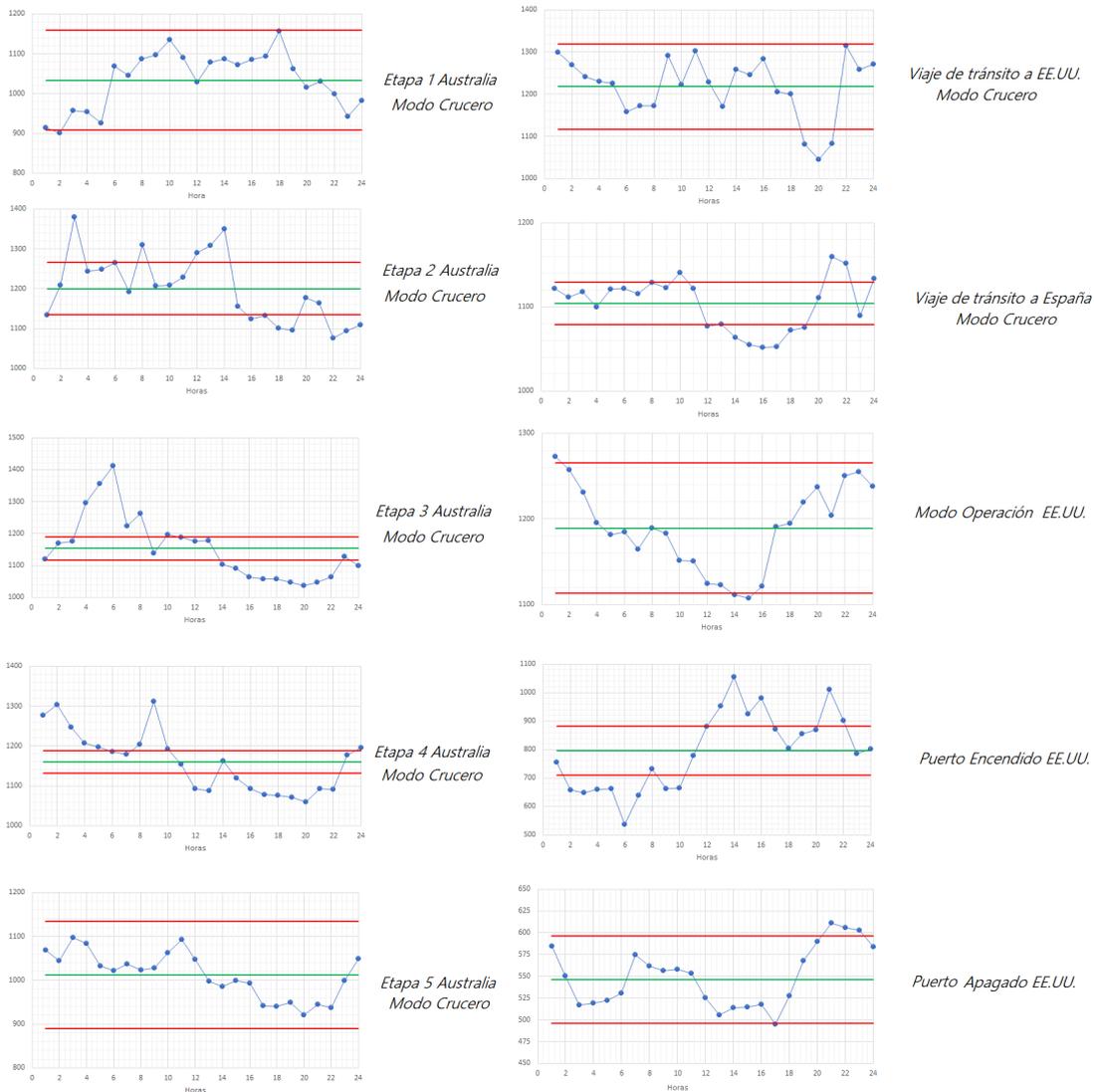


Figura 4.65: Viajes 3 y 4: gráficos de medias. Elaboración propia (2019)

**Gráficos EWMA**

La figura 4.66 muestra el conjunto de los gráficos de control con memoria EWMA de los viajes n° 3 y n° 4 representándose a la izquierda los del viaje n°4 a Australia y a la derecha a los del viaje n°3 a EE.UU. y regreso.

En estos gráficos ninguno de los modos aparece como fuera de control a excepción de la tercera etapa del viaje a Australia de la primera columna y en el modo P.E. en la segunda de las columnas. Al margen de esto debemos remarcar que los gráficos

de las etapas 2 a 5 de la primera columna presentan tendencias y comportamientos similares, estas cuatro etapas se desarrollan en navegaciones en aguas de los Trópicos. La primera etapa se desarrolla en el Atlántico, Mediterráneo y Mar Rojo. Los viajes en modo crucero de EE.UU. no presentan tendencias similares, hay que tener presente que en el tránsito a EE.UU. las condiciones meteorológicas fueron adversas, con olas altas y vientos fuertes lo que puede justificar la mayor variabilidad del proceso con respecto al viaje de vuelta a España en el que no se presentaron estas condiciones adversas.



Figura 4.66: Viajes 3 y 4: gráficos EWMA. Elaboración propia (2019)

### Gráficos CUSUM

La figura 4.67 muestra el conjunto de los gráficos de control con memoria de sumas acumuladas CUSUM de los viajes nº 3 y nº 4 correspondiendo la columna de la izquierda a los del viaje nº4 a Australia y los de la derecha a los del viaje nº3 a

EE.UU. y regreso.

La información que aporta este conjunto de gráficos lo hace fundamentalmente con el modo de puerto encendido del viaje a EE.UU. en el que podemos ver un proceso fuera de control desde el punto horario 13. Lo mismo sucede con la etapa tres del viaje a Australia.

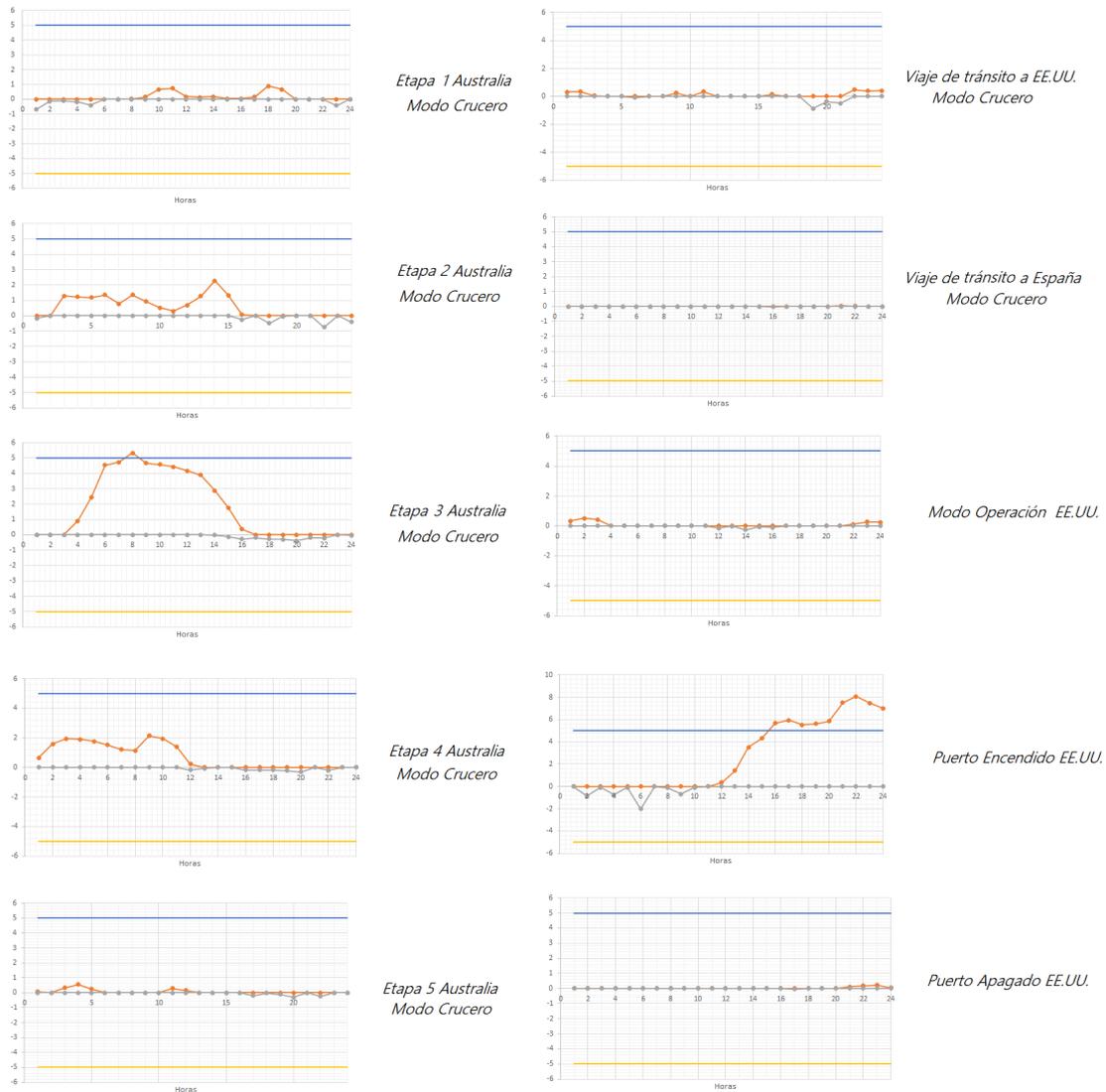


Figura 4.67: Viajes 3 y 4: gráficos CUSUM. Elaboración propia (2019)

La figura 4.68 muestra un segundo grupo de gráficos de control con memoria de sumas acumuladas CUSUM de los viajes nº 3 y nº 4. En ellos podemos ver el comportamiento de los datos según zonas del Globo. En primer lugar vemos el viaje del Atlántico al mar Rojo por el Mediterráneo; los cuatro siguientes en aguas de los trópicos presentando un comportamiento muy similar.

Los dos tránsitos Atlánticos presentan cierta similitud el de operaciones es una situación desarrollada de los dos anteriores y, por último, los modos de puerto presentan la práctica totalidad de los puntos en la zona negativa del gráfico.

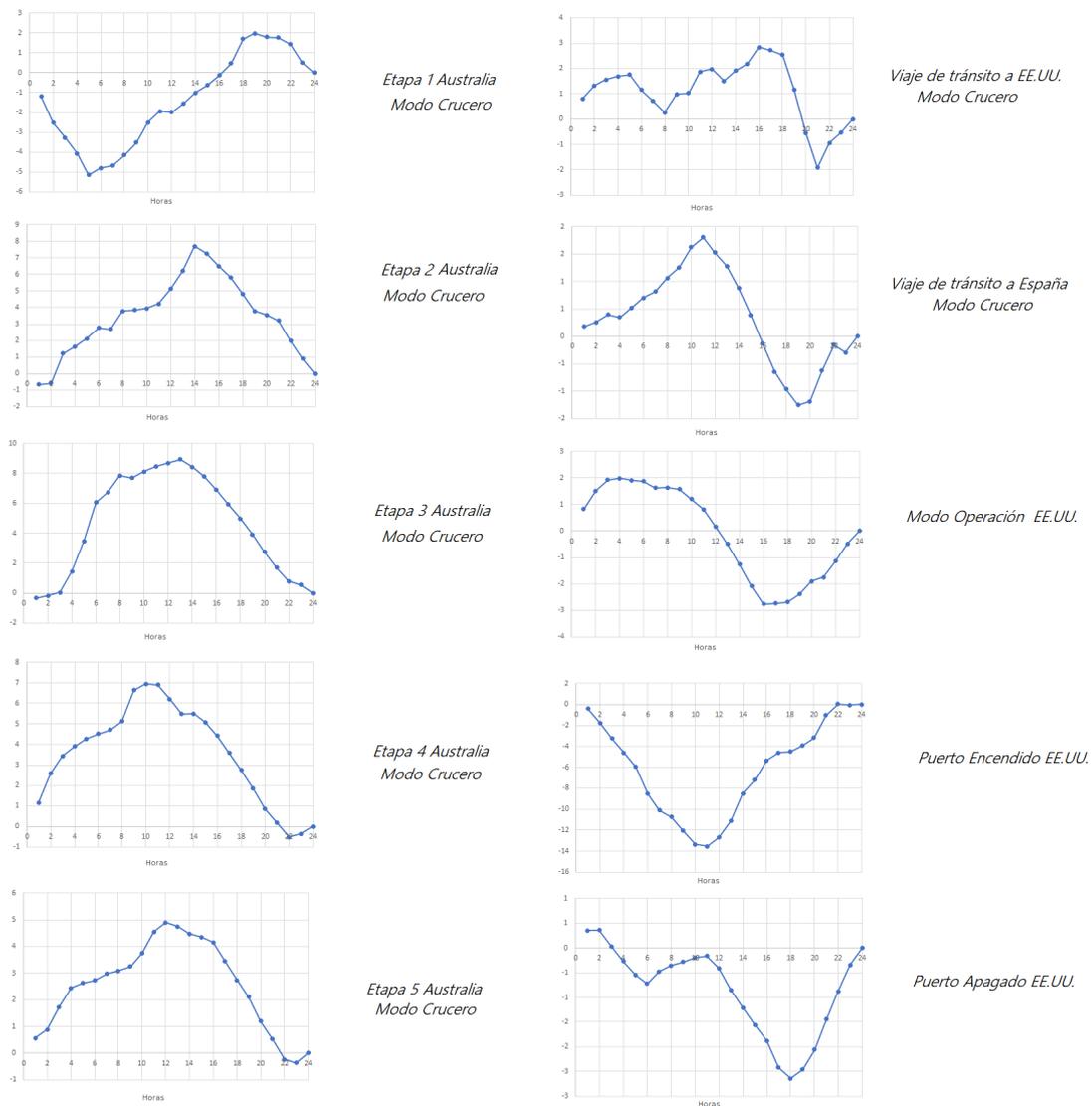


Figura 4.68: Viajes 3 y 4: gráficos CUSUM (2). Elaboración propia (2019)

### Gráficos de medias móviles

La figura 4.69 muestra el conjunto de los gráficos de control de media móvil de los viajes nº 3 y nº 4 correspondiendo la columna de la izquierda a los del viaje nº4 a Australia y los de la derecha a los del viaje nº3 a EE.UU. y regreso.

Estos gráficos son los que presentan mayor información sobre el comportamiento del buque en los distintos modos de operación. Vemos que el modo de P.E. está fuera de control al igual que la tercera etapa como ya se ha detectado en otros gráficos anteriores.

Vemos que las tendencias y comportamientos de los gráficos del modo crucero son semejantes en las etapas 2 a 5, diferenciando la primera, y las dos de EE.UU. que presentan cierta similitud entre ellas. El modo de operación y los modos de puerto presentan comportamientos diferentes en todos los casos.

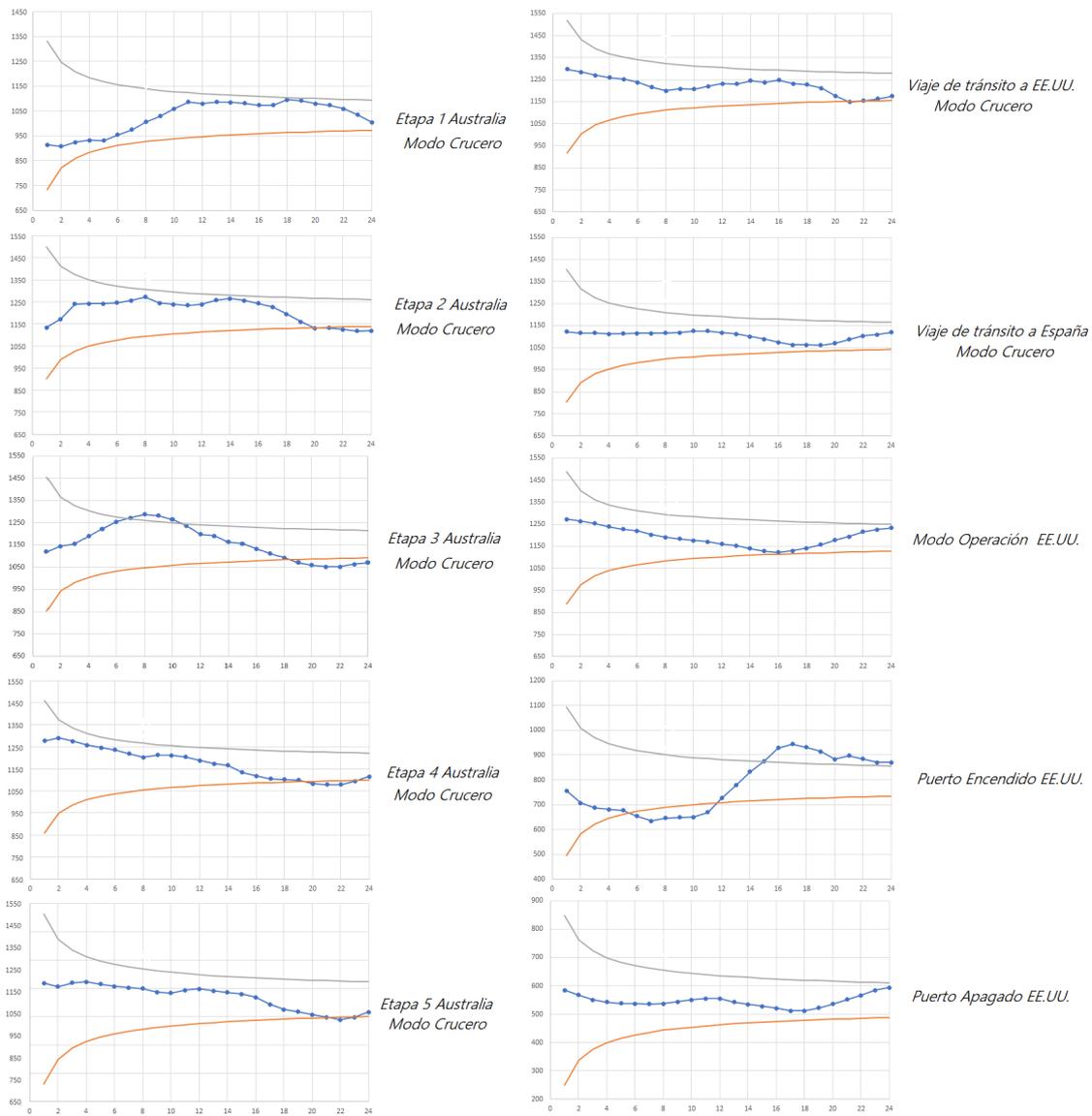


Figura 4.69: Viajes 3 y 4: gráficos de Medias móviles. Elaboración propia (2019)

## 4.5. Cálculo y análisis del EEOI

Basándonos en la formulación de cálculo del EEOI de IMO, vamos a adaptar esta a buques de guerra y, en concreto, a los buques de tipo fragata o destructor. Un buque de guerra desde el punto de vista legal, es todo buque propiedad de un estado que presta servicio en sus Fuerzas Armadas y en general suelen estar exentos de cumplir mucha normativa que afecta a buques civiles para los que es obligatoria [211].

Los buques de guerra en general y, el caso del buque de escolta analizado en este estudio en particular, tienen funciones distintas a los buques civiles como cargueros, pesqueros o de pasaje y por ello, se hace necesario adaptar los criterios de aplicación del EEOI a los buques de guerra y, en concreto, a nuestro buque.

En el caso de los buques de guerra, existen distintos modos de operación que debe-

mos tener presentes en el cálculo del EEOI por lo que hay que considerar el tiempo de vida útil que desglosaremos en dos: un periodo de estancia en el mar y otro de estancia en puerto. Los anteriores, están divididos como podemos ver en la figura 4.70 en periodos de crucero, fondeado u operación el primero y en periodos de puerto encendido, puerto apagado o mantenimiento el segundo.

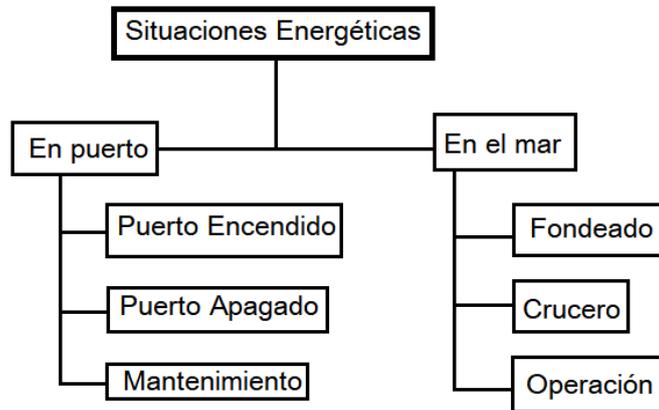


Figura 4.70: Distribución del ciclo de vida del buque. Elaboración propia (2019)

#### 4.5.1. El EEOI del buque analizado

El uso de este índice permite analizar el consumo y emisiones de  $CO_2$  de los buques y facilita así, la selección de mejoras para reducir el uso de combustible y por tanto mejorar la EE, permitiendo establecer requisitos en el diseño y construcción de los buques, bien exigidos por las empresas navieras o bien por los diferentes gobiernos en la construcción de buques de guerra, favoreciendo así la reducción de las emisiones de GEI y la mejora de la EE.

En nuestro estudio hemos visto que, la aplicación de este índice, es totalmente viable para un buque de guerra siempre y cuando hagamos una serie de correcciones a los parámetros que emplea para conseguir la máxima eficiencia, el menor consumo y menores emisiones, cumpliendo los requerimientos de velocidad y navegabilidad de los buques de la Armada [57].

La EE se analiza con el EEOI, será mejor cuanto más bajo sea este índice, esto indicará menor cantidad de  $CO_2$  por valor del trabajo realizado por unidad de evaluación del índice. Para su cálculo, el valor de índice individual lo expresaremos con la ecuación 2.24 para cada viaje considerado de forma individual:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{carga} \times D}$$

Para una batería de viajes se hace en base a la fórmula 2.25 como promedio:

$$EEOI_{Average} = \frac{\sum_j \sum_i FC_{ij} \times C_{Fj}}{\sum_i m_{carga} \times D_i}$$

Debemos tener presente que los buques como el que se analiza en esta tesis están dentro de la denominación en inglés de “Combatants”, que bien podemos traducir

como buques combatientes es decir, son los barcos cuya misión no es otra que llevar el peso de las operaciones militares propiamente dichas así, los elementos que nos pueden ayudar a discriminarlos son su desplazamiento y su dotación. Cuanto más grande más desplazamiento y más dotación necesitan para su funcionamiento<sup>4</sup>. Por ello, estos dos parámetros son los que jugarán como valor de carga en las fórmulas 2.24 y 2.25 que se expresarán para nuestro caso:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{(d_i \times D_i) + (p_i \times D_i)} \quad (4.2)$$

$$EEOI_{Average} = \frac{\sum_j \sum_i FC_{ij} \times C_{Fj}}{\sum_i (d_i \times D_i) + (p_i \times D_i)} \quad (4.3)$$

En las fórmulas 4.2 y 4.3 tenemos:

$j$ : es el tipo de combustible empleado en la navegación.

$i$ : el número de viaje al que corresponde el consumo.

$FC_{ij}$ : masa de combustible  $j$  consumido en el viaje  $i$ .

$C_{Fj}$ : factor de conversión de la masa de combustible  $j$  en masa de  $CO_2$

$d_i$ : desplazamiento del buque en  $i$ .

$p_i$ : dotación embarcada en  $i$

$D_i$ : distancia recorrida en el viaje  $i$  en millas náuticas ( $nm$ ).

En la fórmula, para nuestros cálculos, los elementos que entran a jugar son el tipo de combustible, que en nuestro caso es “Destillated Fuel Marine” (DFM) F-76, con un factor que consideraremos de guías de cálculo<sup>5</sup> de  $3,21(Kg(CO_2)/Kg(F - 76))$ ; la dotación (número de personas embarcadas) que es de 202 y el desplazamiento que es de 5.600 Tn.

Aplicando la formulación obtenemos un valor del EEOI para cada uno de los viajes considerados. Disponemos de datos de consumo de combustible de un periodo completo que abarca desde noviembre de 2012 hasta junio de 2017. En primer lugar vamos a discriminar los datos completos por ejercicio anual por lo que, descartaremos en un primer momento, los datos correspondientes a 2012 y 2017. Considerando los años completos de la base de datos 2013 a 2016 que nos permiten hacer un primer análisis comparativo de periodos de puerto y mar los cuales, podemos ver en el cuadro 4.6 en que se reflejan los años y los modos en %.

<sup>4</sup>Como ejemplo, una fragata o destructor puede desplazar entre 5.000 y 8.000 Tn y contar con una dotación de entre 150 y 350 personas; el caso de los portaaviones de ataque sería el extremo de este tipo de buques donde, el desplazamiento puede ser del orden de 105.000 Tn con dotación máxima de cerca de 6.000 personas (USS Nimitz).

<sup>5</sup>La base de selección de valores se hace en base al Real decreto 1088/2010 de tres de septiembre relativo a especificaciones técnicas de combustibles de uso marítimo.

#### 4.5. CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL EEOI

Año	total	P.A.	P.E.	P.A.N.	P.E.N.	N.
2013	100 %	36 %	48 %	0 %	7 %	9 %
2014	100 %	26 %	32 %	0 %	10 %	32 %
2015	100 %	41 %	38 %	1 %	41 %	15 %
2016	100 %	34 %	45 %	1 %	8 %	12 %

Cuadro 4.6: En % por modo de funcionamiento. Elaboración propia (2019)

De igual forma, en el caso del análisis de los consumos de combustible consideramos los siguientes modos de operación referidos en la tabla como P.A. , P.E., P.E.N., P.A.N y N.:

1. **Puerto:** el buque está atracado con dos posibilidades, una en la que permanece encendido con sus propios medios y la otra apagado recibiendo toda la energía eléctrica necesaria de la red eléctrica terrestre. Estas posibilidades se han referido como puerto encendido (P.E.) y puerto apagado (P.A.)
2. **Crucero:** está relacionado con la navegación a velocidad económica de un punto a otro del Globo. Se le ha denominado con la letra N. El barco produce toda la energía necesaria.
3. **Operación:** cuando un buque está cumpliendo la misión concreta se dice que está en operación. El buque produce toda la energía necesaria. Se ha referido con N. también ya que esta dura horas reducidas dentro de las situaciones de navegación y, no se ha visto necesario discriminarlas.
4. **Mixtas:** son aquellas situaciones en las que durante el mismo día el buque está en puerto y navegando, se han denominado Puerto Encendido y Navegando (P.E.N.) y Puerto Apagado y Navegando(P.A.N.).

Como podemos ver hacemos una pequeña variación y en este caso consideramos englobados los días de operación con los de crucero y los notamos todos con la letra N. En la figura 4.71 podemos ver una representación gráfica de lo arriba expuesto.

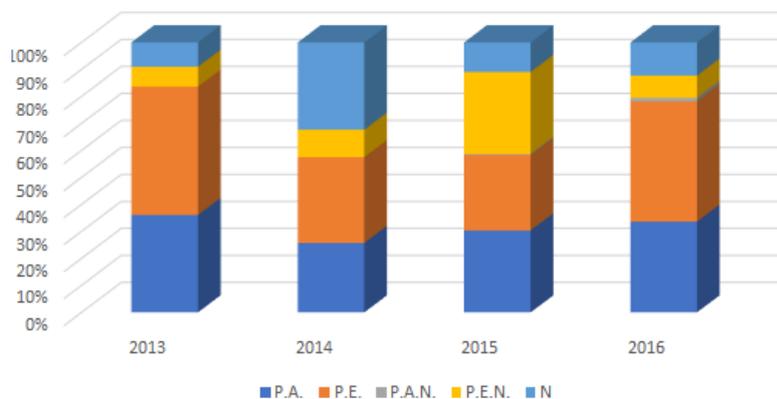


Figura 4.71: Condiciones entre 2013 y 2016. Elaboración propia (2019)

Comparando con los valores establecidos en el diseño del ciclo de vida del cuadro 3.3, vemos que el buque debe pasar en las condiciones de mar entre el 30 y el 35 %

#### 4.5. CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL EEOI

del tiempo, el restante 65 a 70% repartido entre P.E, P.A. y en mantenimiento. De los cuatro años considerados, podemos ver que en valores medios para el periodo tenemos:

- **Periodos de mar:** donde el promedio de los cuatro años es del 34% si bien se establecen diferencias de rango de 16% en 2013 y 57% en 2015.
- **Periodos de puerto:** en el que el promedio de los cuatro años 73% y, en este caso no el rango va del 60% en 2014 al 79% en 2015 y 2016.

Esto evidencia que las estimaciones de periodos establecidas en el diseño pueden asumirse, a la vista de los datos reales del buque estudiado, como buenas y aceptables. Así pues, aplicando la formulación de 4.2 y 4.3 obtenemos los siguientes resultados del EEOI que podemos ver en la tabla 4.7, donde se presentan los días navegados entre noviembre de 2012 y junio de 2017 con un índice EEOI por año.

Año	Días	Tn F-76	$\frac{Tn(CO_2)}{TnF-76}$	Millas	EEOI
2012	4	71	3,21	575	66,33
2013	59	970	3,21	10.451	49,65
2014	154	3.247	3,21	33.957	51,15
2015	157	475	3,21	4.160	61,06
2016	29	935	3,21	8.490	58,87
2017	78	2.224	3,21	21.217	56,05
Media	80	1.320	3,21	13.142	57,18

Cuadro 4.7: Valor del EEOI promedio anual. Elaboración propia (2019)

En la tabla podemos ver los valores de EEOI calculados para los promedios de los viajes considerados que arrojan un valor promedio anual de 57,18. No existe gran variabilidad oscilando entre 66 y 50 de valores máximos y mínimos en este cálculo. Si pormenorizamos el cálculo para viajes concretos separando estos, vemos que el resultado final promedio es aproximadamente igual, siendo este de 57,58. En la figura 4.72 podemos ver los valores obtenidos para una batería de 72 viajes analizados.

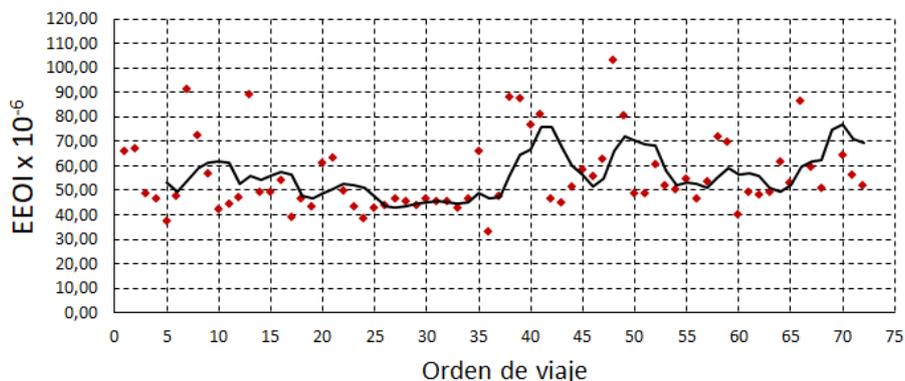


Figura 4.72: Viajes considerados entre 2012 y 2017. Elaboración propia (2019)

Estos 72 viajes realizados entre noviembre de 2012 y junio de 2017 representan el 90% de los viajes hechos por el buque en ese periodo. Se han eliminado desplazamientos de cambio de amarradero, movimientos de mantenimiento y navegaciones de pruebas después de obras incidentales realizadas con motivo de estas reparaciones.

La curva de media móvil de periodo 5, muestra que la variación del EEOI se enmarca entre los valores 40 y 80. Del análisis estadístico de los datos los valores máximo y mínimo son 124,5 y 33,17 respectivamente; el valor de la media es 49,91 y la media de 54,59 con una varianza del proceso de 282,19 que nos indica una dispersión reducida con  $\sigma = \sqrt{282,18} = 16,80$  de los datos así, el proceso se puede considerar predecible teniendo presentes variables de tipo cualitativo también, como puede ser el tipo de operación o ejercicio que se hacen a bordo.

El valor del viaje correspondiente a la navegación de Brisbane a Sídney en Australia (124,5) está influido por varios elementos de tipo cualitativo así, hay que considerar que el buque se sometió a una prueba de navegación en condiciones extremas de mala mar en modo turbina, con la suma de las condiciones ambientales (vientos fuertes y olas de más de 4 metros) el consumo se disparó y elevó el EEOI del viaje; los datos relativos a cada uno de los 72 viajes considerados para este cálculo se encuentran concentrados en una base de datos validada a ta efecto y no se incluyen en el trabajo por cuestiones de confidencialidad.

Además de un EEOI particular, hemos calculado un viaje promedio, cuya duración es de 6 días, 6 con un consumo promedio de 134,76 Tn de F-76, recorriendo 1.333 millas marinas (2.469 Km), a una velocidad media de 9,26 nudos y un valor del EEOI de 56,59.

En la figura 4.73 vemos los puertos tocados en el periodo 2012-2017 evidenciando la amplitud del área geográfica en la que se desarrolló la actividad de nuestro barco lo que conlleva también la variabilidad de condiciones climáticas a las que se ve sometido el buque.

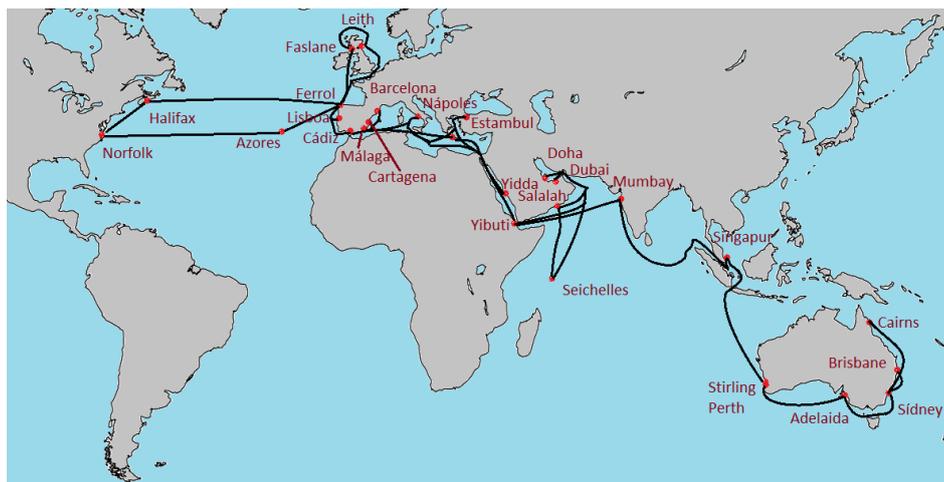


Figura 4.73: Puertos. Elaboración propia (2019)

Un periodo interesante de remarcar en este estudio, es el que abarca la operación de lucha contra la piratería en 2014 entre el 23 de febrero y el 10 de julio, que representa un total de 138 días. En este período el buque se activa como buque de

mando en las operaciones en el Cuerno de África. en este periodo el buque desarrolla las funciones para las que está diseñado. La condición de P.E. y la condición de N. ocupó el 63 % del periodo de la operación.

Los valores del EEOI modificado oscilaron para el periodo SNMG-2 (el más característico por el peso del consumo frente al periodo completo) entre 43,31 de la etapa Estambul a Nápoles y el valor de 66,9 de la etapa Málaga a Ferrol debido al mayor uso de turbinas para la propulsión en este último. El valor medio del indicador EEOI modificado para buques de guerra en función del desplazamiento y número de tripulantes para este periodo está por debajo de 55,15 muy aproximado al valor promedio calculado para la batería de 72 viajes. El EEOI es un número adimensional que permite conocer el comportamiento del sistema buque, para hacer más tangible su significado, estudiaremos los valores de consumo de los sistemas de propulsión y generación eléctrica de forma cuantitativa, lo que nos permitirá conocer su entidad y posteriormente, descomponer el EEOI en base a modos.

#### 4.5.2. Análisis del consumo de combustible

En este apartado vamos a estudiar el comportamiento del buque con respecto al consumo de combustible en un periodo que barca desde noviembre de 2012 hasta junio de 2017. Para ello analizaremos por separado el comportamiento del consumo de F-76 en generación eléctrica y, por otro lado, el consumo de combustible dedicado a la propulsión del buque; en las bases de datos preparadas, se concentran datos de consumo del buque separado en propulsión y generación además de los valores de emisiones de  $CO_2$  diario y los valores de distancias recorridas y el modo de funcionamiento del buque, que en este caso solo se refleja si el buque está en puerto encendido o apagado y navegando <sup>6</sup>.

Si observamos la figura 4.74 podemos ver el consumo de los DD.GG. en puerto en litros por hora ( $l/h$ ) sobre el eje de ordenadas y en el de abscisas aparecen reflejados el número de días. El gráfico de dispersión muestra que el consumo de estos motores de generación en puerto oscila entre los 100 y 200 ( $l/h$ ), la banda en la que se concentran los consumos del buque esta entre 150 y 200 ( $l/h$ ).

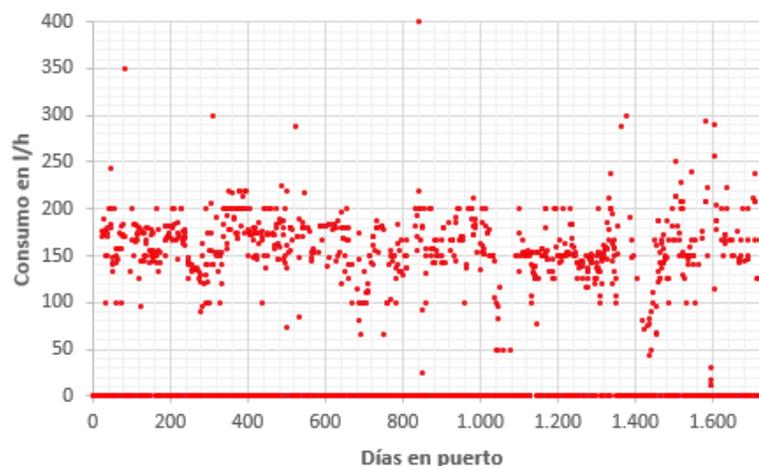


Figura 4.74: Consumo de DD.GG. en puerto. Elaboración propia (2019)

<sup>6</sup>Las bases de datos de esta tesis no son de disposición pública por cuestiones de confidencialidad

Por contra si vemos la figura 4.75 tenemos concentrado el consumo en el valor de 150 ( $l/h$ ), esto indica que el consumo de los diésel en el mar es más estable que en puerto y menor en proporción. Todo ello puede indicar la influencia en el consumo del modo.

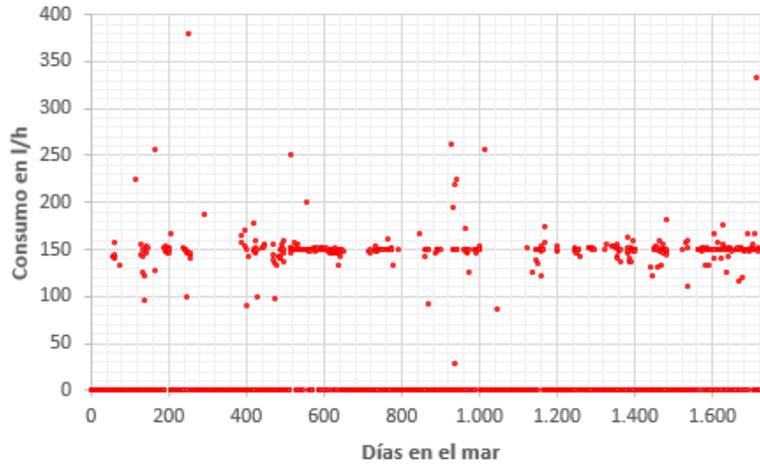


Figura 4.75: Consumo de DD.GG. en el mar. Elaboración propia (2019)

Si observamos la figura 4.76 vemos que el consumo en puerto de los MM.PP., de esta no se puede obtener un valor claro, esta situación es anormal y puede considerarse despreciable con respecto al consumo en navegación.

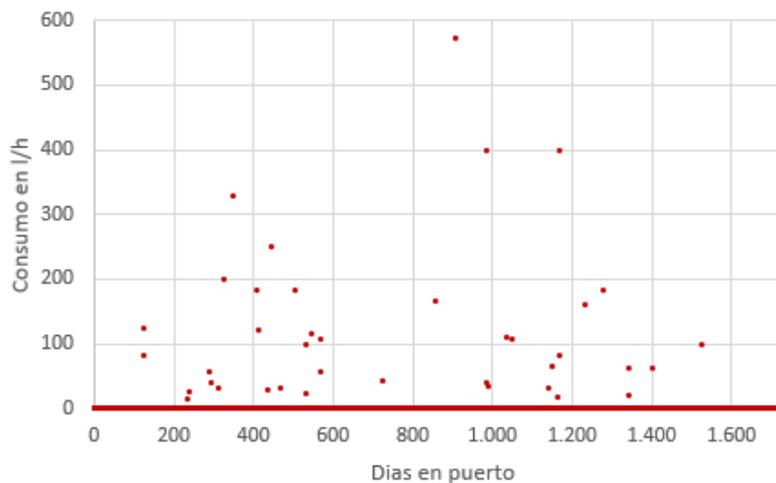


Figura 4.76: Consumo de MM.PP. en puerto. Elaboración propia (2019)

La figura 4.77 muestra el consumo de combustible F-76 de los motores principales en el mar, podemos ver que los valores se concentran entre 500 y 1.000 ( $l/h$ ), obteniendo un valor promedio de 923 ( $l/h$ ).

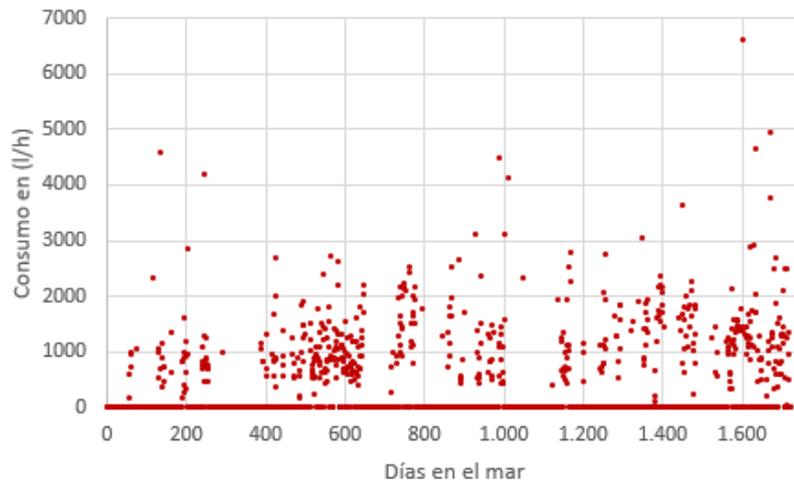


Figura 4.77: Consumo de MM.PP. en el mar. Elaboración propia (2019)

Queda evidenciado que el consumo de combustible en puerto es mayor que en el caso del buque navegando lo que puede ser también una pista de la influencia de las condiciones ambientales en el consumo como puede ser la temperatura del agua de mar.

#### 4.5.3. Análisis del EEOI calculado en base a los modos

Si analizamos el valor de los modos de operación en conjunto de los 72 viajes considerados, vemos que los valores de las dos condiciones de C.R. y O. difieren. En el caso de los valores anuales por condición tenemos los resultados del cuadro 4.8 donde, los valores extremos son de 66,62 para el modo de Operación (O.) y de 64,32 para el modo de Crucero (C.R.). Los valores medios respectivos para O. y C.R. de 58,11 y 56,18.

Modo	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Medias
C.R.	-	46,62	52,02	58,80	59,14	64,32	56,18
O.	66,62	58,13	52,14	64,90	50,87	55,98	58,11

Cuadro 4.8: Valores del EEOI por condición. Elaboración propia (2019)

Si bien en alguno de los años el valor del EEOI es más elevado en C.R. que en O. (véase figura 4.78), esto se debe a que alguna de las navegaciones se empleó el modo de turbina lo que, si no se hace de forma regulada, puede disparar el consumo de combustible por emplear estas en regímenes demasiado bajos que disparan el consumo o en condiciones climatológicas adversas. Las turbinas en bajo régimen consumen más que el diésel y podemos considerar que, para motores diésel el rango máximo 175 gr/KWh al 95% de carga y 200 al 20% y en turbina de gas 207 gr/KWh al 95% y, 400 al 20% [212]. Dependiendo de las fuentes se dan otros valores menores para diésel de 99 gr/KWh y para turbinas de 135 gr/KWh pero todos dentro del entorno anterior [213].

## 4.5. CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL EEOI

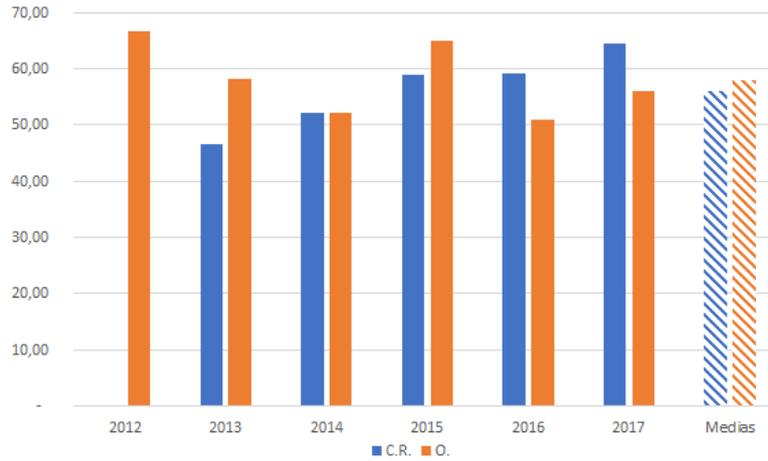


Figura 4.78: Valores del EEOI por modos y años. Elaboración propia (2019)

AÑO	Viaje	Días	EEOI x 10EXP-6 (II)	Modo	AÑO	Viaje	Días	EEOI x 10EXP-6 (II)	Modo
2012	1	3	66,12	O.	2014	37	3	47,31	C.R.
2012	2	1	67,12	O.	2014	38	9	88,15	O.
2013	3	2	48,78	O.	2014	39	4	87,30	C.R.
2013	4	3	46,48	C.R.	2014	40	4	76,82	O.
2013	5	2	37,41	O.	2015	41	9	80,82	O.
2013	6	4	47,69	O.	2015	42	7	46,62	C.R.
2013	7	2	91,15	O.	2015	43	5	44,98	C.R.
2013	8	2	72,09	O.	2015	44	5	51,25	O.
2013	9	6	56,91	C.R.	2015	45	3	58,59	O.
2013	10	4	41,95	O.	2015	46	9	55,69	O.
2013	11	3	44,20	C.R.	2015	47	10	62,61	O.
2013	12	6	46,93	C.R.	2015	48	3	103,30	C.R.
2013	13	3	88,99	O.	2015	49	3	80,46	O.
2013	14	6	49,37	C.R.	2015	50	3	48,90	C.R.
2013	15	2	49,37	O.	2015	51	11	48,67	C.R.
2013	16	3	54,17	O.	2015	52	5	60,32	C.R.
2013	17	3	39,01	C.R.	2016	53	3	51,73	O.
2013	18	3	46,56	O.	2016	54	3	50,00	O.
2013	19	3	43,44	C.R.	2016	55	3	54,65	C.R.
2013	20	2	61,24	O.	2016	56	3	46,35	C.R.
2014	21	18	63,33	C.R.	2016	57	7	53,39	C.R.
2014	22	3	49,81	C.R.	2016	58	3	71,67	C.R.
2014	23	3	43,30	C.R.	2016	59	7	69,67	C.R.
2014	24	6	38,37	C.R.	2017	60	10	40,10	C.R.
2014	25	7	42,88	C.R.	2017	61	6	48,94	C.R.
2014	26	8	43,83	O.	2017	62	7	48,26	C.R.
2014	27	12	46,40	O.	2017	63	8	49,23	C.R.
2014	28	6	45,31	O.	2017	64	9	61,80	O.
2014	29	14	43,69	O.	2017	65	5	52,78	C.R.
2014	30	15	46,67	O.	2017	66	8	86,39	C.R.
2014	31	7	45,27	O.	2017	67	5	59,54	O.
2014	32	9	45,24	C.R.	2017	68	5	50,64	O.
2014	33	8	42,57	C.R.	2017	69	2	124,53	C.R.
2014	34	14	46,36	C.R.	2017	70	5	64,41	O.
2014	35	3	65,75	C.R.	2017	71	8	56,33	O.
2014	36	4	33,17	O.	2017	72	14	51,60	O.

Figura 4.79: Datos tabulados de las navegaciones. Elaboración propia (2017)

La figura 4.79 presenta los valores tabulados de los viajes considerados a los que se les ha asignado un modo de funcionamiento C.R. y O. según se hayan hecho adiestramientos, maniobras o ejercicios reales en el caso del modo O. y tránsitos

para el modo C.R. En esta figura podemos ver representado el año, los días, el valor calculado del EEOI el cual, debe multiplicarse por  $10^{-6}$  para obtener su valor real.

#### 4.5.4. Comparación del EEOI calculado con el de mercantes

Antes de desarrollar este punto, es necesario recordar que hemos hecho una adaptación del EEOI para buques de guerra basando su cálculo en el desplazamiento y el número de personas (dotación) que embarcan [57]. Esto quedó justificado en el apartado 4.5.1 y no desvirtúa la posible comparación con buques mercantes.

En el caso analizado (un “Combatant”), hemos obtenido valores del EEOI que se encuentran en un entorno de 50 a 60 como promedio, influyendo en ello el tipo de propulsión que se usa, es decir, si se usan los diésel o las turbinas de gas. El desplazamiento y la dotación se han considerado fijas, si bien, esta puede variar durante su ciclo de vida pero, para este cálculo la aproximación se considera suficiente puesto que no sucede lo mismo que sucede con los buques mercantes en los que, por ejemplo, en desplazamiento varía de forma considerable entre su condición de máxima carga y su condición de lastre (sin carga). Es el caso de un “Bulk Carrier”<sup>7</sup> [214].

En nuestro caso influirán de forma decisiva en el funcionamiento eficiente de nuestro sistema buque los siguientes elementos:

- El tipo de combustible y su nivel de emisiones de GEI.
- El desplazamiento del buque y la dotación como unidad de valor.
- El tiempo y la distancia recorrida en el viaje o en una batería de estos.

Es decir, cuanto más grandes más eficientes serán los buques de guerra considerando los parámetros anteriores y por tanto, comparativamente con los buques civiles, las dependencias son muy similares. Comprobando estudios similares en buques civiles como los algunos realizados para “Bulk Carriers” [215], en los que se mejora con el tamaño siendo más eficientes los buques de 400.000 Tn en un orden de 50% por Tn que los de 180.000 Tn ya que de esta forma, se reduce el coste por tonelada transportada y así la rentabilidad comercial.

De igual forma, la distancia recorrida y el tiempo empleado influirán en el valor final de EEOI. Podemos ver en otros estudios como la velocidad adaptada influye en el cálculo final tomando como ejemplo el estudio de Nicoleta Acomi de 2014 [216], oscilando para un buque “Quimiquero”<sup>8</sup> su EEOI entre 12 y 15 como valor promedio en aquellos viajes que se realizan a velocidades controladas en largas distancias, esto es, adaptar la velocidad a las condiciones de los parámetros ambientales por ejemplo.

Esta adaptación si bien aumenta el tiempo del desplazamiento, puede favorecer el ahorro y, por tanto la planificación de las navegaciones es fundamental y será otro parámetro para tener presente en la EE como sistema de sistemas.

La misma autora considera necesario incluir otros parámetros como los de mantenimiento de la superficie del casco en contacto con el agua (reducción de la resistencia), pues es otro elemento determinante de la mejora de la eficiencia en conjunción

<sup>7</sup>Este tipo de buques son cargueros que transportan cargas a granel no líquidas de distinto tipo. esta carga es la fundamental en el cálculo del EEOI.

<sup>8</sup>Este tipo de buques transportan productos químicos de distinta índole como pueden ser ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) o amoníaco ( $NH_3$ ) empleados en múltiples procesos industriales.

con parámetros de velocidad, distancia o carga transportada [217].

La base bibliográfica en esta materia es amplia y existen numerosas referencias [218] en las que se apunta a cálculos dinámicos del EEOI teniendo presente la velocidad del desplazamiento, en el caso de nuestro buque este extremo queda evidenciado en el análisis hecho al final del apartado 4.5.1.

Al margen de todo lo anterior, lo que si se observa en el caso de buques de guerra, es que el valor del EEOI de los casos analizados en la bibliografía referente a buques civiles oscila en general entre 5 y 20 dependiendo de las situación de carga, las distancias recorridas y otros elementos como la velocidad. Por otro lado, en el caso de los buques de guerra, al tener valores entre 45 y 70 vemos que estos son menos eficientes que los buques mercantes.

En la figura 4.80 hemos representado los valores del EEOI por viaje y los valores de la velocidad media ( $V_m$ ) calculada como cociente entre las millas recorridas y el tiempo empleado para recorrerlas, también se representa el valor medio de estos como línea de referencia. Se observa que, los valores del EEOI no siguen las tendencias de la velocidad en todo momento, de hecho el valor de correlación de Pearson de estos valores, ofrece un valor de 0,20 lo que indica una correlación débil positiva lo que es indicativo que parámetros como las condiciones climáticas o la actividad de la dotación en el manejo de los sistemas del buque también influirá en el EEOI.

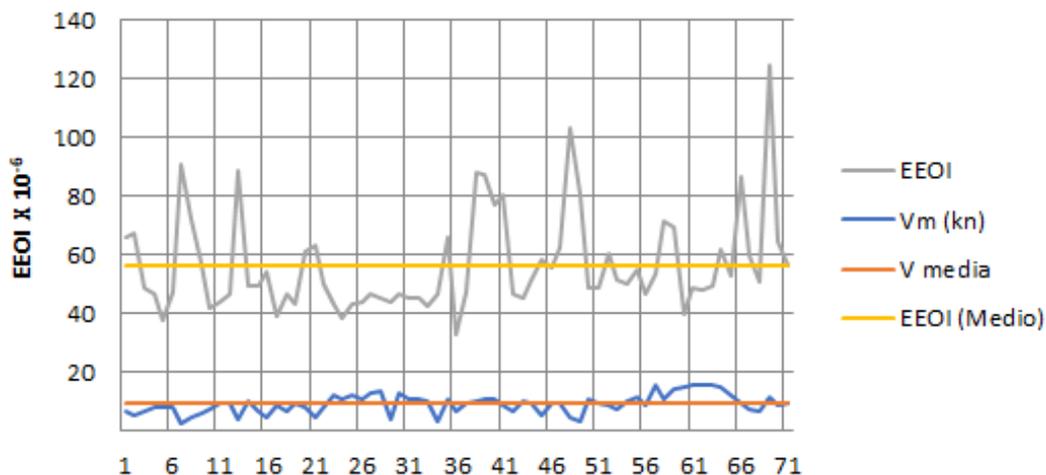


Figura 4.80: EEOI frente a la  $V_m$  del viaje. Elaboración propia (2017)

## 4.6. Simulación numérica

Hemos procedido a elaborar una simulación numérica como ejercicio que, con base en los datos del viaje de prueba, nos permita estimar en cierta medida el efecto del agua de mar que rodea la carena del buque para la condición de P.E. ya que este tipo de buques pasan una buena parte de su vida útil en puerto (cuadro 3.3). En esta condición el buque no se mueve y produce toda su energía con su planta eléctrica. En la sección 4.3 detectamos que la temperatura del agua de mar tiene correlaciones significativas y por tanto es un buen punto de partida para efectuar esta simulación. Hay que tener presente que la optimización energética de los motores encargados de general energía en el buque son fundamentales a la hora de diseñar el buque [219].

Buscaremos ver como se comporta el sistema compuesto por el agua, aire y buque; interesa especialmente la temperatura del agua que rodea la carena en su obra viva, ya que al ser estática la situación nos puede dar pistas sobre el consumo. Si resolvemos la ecuación de transmisión de calor 4.4:

$$\rho C_p \left( \frac{\delta T}{\delta t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + Q \quad (4.4)$$

Donde:

$[\rho]$  : es la densidad del agua de mar.

$[C_p]$  : es el calor específico a presión constante.

$[t]$  : representa el tiempo.

$[T]$  : es la temperatura.

$[u]$  : es el vector velocidad.

$[k]$  : es el coeficiente de conductividad térmica.

$[Q]$  : representa los focos de calor existentes.

Aplicando elementos finitos y mediante la integración numérica empleando el programa comercial “SolidWorks”, creamos una matriz de ecuaciones algebraicas e integramos sobre un mallado de nodos que aproximaremos al volumen de la carena y a su superficie del forro. De esta forma generamos una ecuación para cada nodo en los que la variable incógnita es la temperatura  $T$  [220]. El sistema de ecuaciones lineales que se crea emplea el método del gradiente conjugado general condicionado [221].

Hay que tener muy presentes en estas simulaciones las condiciones de contorno y así, se han utilizado las de Dirichlet en nuestra simulación. Por otro lado, en la superficie de la carena en contacto con el agua de mar circundante, se incluyen las condiciones de contorno de Neuman, correspondientes al flujo de calor así, en nuestro modelo, el buque está en el seno de dos volúmenes infinitos, uno de aire y otro de agua de mar donde, la transmisión de calor, se produce por convección natural. Las formas de la fragata F-105 se muestra en la figura 4.81.

El casco del buque proporciona un flujo de calor constante que está modelado como una superficie de acero de 25 mm de grosor (por simplificar elementos) y con unas dimensiones aproximadas de 135 m de eslora (L), 20 m de manga (B) y puntal máximo se ha considerado de 40 m (D). El dominio numérico es el doble de estas dimensiones generando una malla de 990.377 nodos y 700.037 elementos con un tamaño máximo de 1,0 m y un tamaño mínimo de 0,2 m y lo podemos ver también en la figura 4.81.

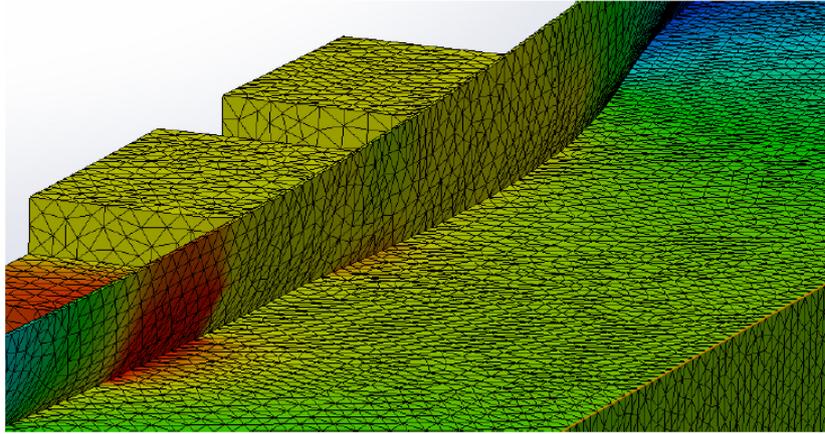


Figura 4.81: Formas de buque considerado y mallado para computación. (2017)

Cuando simulamos transferencia de calor y temperaturas, los gradientes del flujo de calor ( $Q$ ) se calculan en base a la forma en que se genera ese calor: conducción, convección y radiación. Las temperaturas se asumieron constantes en principio y se establece en cada cámara de máquinas que podemos ver representadas en la figura 4.81 y sobre la base de datos reales recopilados. Esto tiene en cuenta el funcionamiento de diferentes consumidores.

El estudio se llevó a cabo en estado estacionario y, para el casco del buque, se consideró un calor específico de  $460 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  típico de aceros aleados. La transferencia de calor se modela con una condición límite para el flujo de calor ( $q$ ) de la forma:  $q = h\Delta T$ , donde  $h$  es el coeficiente de transmisión de calor con valor  $50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-2}$ . El agua de mar se considera de masa infinita y con temperatura asintótica de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se tiene presente la conducción sólido líquido y, la convección con ambiente exterior al que se le estima una temperatura promedio de 10 centígrados. El coeficiente de convección para el aire se ha fijado en  $20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-2}$ . El resultado de la simulación lo podemos ver en la figura 4.82.

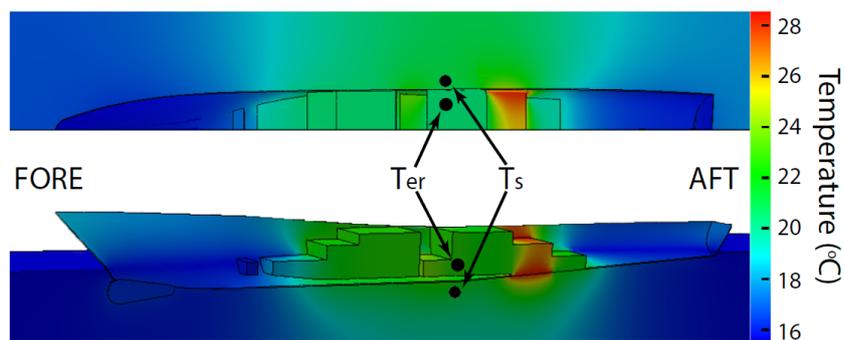


Figura 4.82: Simulación numérica de nuestro buque (2017)

La simulación numérica de la temperatura del modelo se hace en estado estacionario y con una distribución correspondiente con la geometría (formas) de la fragata F-105 de la figura 3.9 y el agua de mar circundante, utilizando el mallado de la figura 4.81.

Las representaciones gráficas que podemos ver en la figura 4.82 se corresponden

#### 4.7. PLANTEAMIENTO DE UN MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DE CONSUMO

---

con las vistas en planta y de costado del buque, el cual se encuentra en el modo P.E.. Dos puntos negros representan los puntos en los que se calculan los valores que son  $T_{CM2} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $T_{am} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ , que se refieren a la cámara de máquinas y al agua de mar.

Las incertidumbres numéricas fueron analizadas modificando el número de nodos y elementos y comprobando la interdependencia de la malla o red de las soluciones numéricas para asegurar la validez de los resultados [222]. Para la comprobación se tomaron tres sistemas de redes compuestos por 428.942, 619.357 y 990.377 nodos aplicando la extrapolación de Richardson. En el tercer caso, el error relativo extrapolado y el índice de convergencia de finegrid [223] para la temperatura promedio del agua de mar se encontraban alrededor de 0,034% y 0,045% respectivamente. Así, la precisión es suficiente según los estándares habituales [224]. Se recalculó cambiando el medio informático con el “Comsol Multiphysics R” encontrando desviaciones mínimas y arrojando los mismo valores en la práctica.

Visto lo anterior, y las simplificaciones hechas, podemos considerar que asumir un coeficiente de transferencia de calor de valor único y utilizar flujo laminar puede ser una simplificación excesiva pero, de todas formas, sí es una buena aproximación para el caso de una situación momentánea en puerto recogido con buenas condiciones climáticas, donde las velocidades del agua cerca de la nave pueden ser inferiores a unos pocos centímetros por segundo [225]. Con un valor adecuado de  $h$ , los resultados de la simulación se comparan de forma satisfactoria con los valores experimentales [226]. Se podría cubrir una gama más amplia de casos con enfoques más sofisticados, pero como aproximación a un modelo numérico de simulación es suficiente [227].

El modelo anterior, se ajusta a los datos obtenidos del estudio en el primero de los viajes de prueba, donde la temperatura del agua de mar ( $T_{am}$ ) se eleva desde un valor casi constante de  $14,4 \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  a una temperatura de  $20,1 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Son valores semejantes a los obtenidos en la figura 4.82, donde  $T_{am}$  se identifica con el valor promedio de la temperatura del agua entre las dos tomas de mar del buque. El valor obtenido de la simulación es  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que está en buena concordancia con los datos obtenidos en la situación de P.E. del primer viaje al final del periodo analizado.

Por tanto, el análisis numérico muestra que puede esperarse que la temperatura alrededor de un barco estático en modo P.E. aumente sensiblemente. Esta es probablemente la causa del aumento de la temperatura del agua de mar. Por otro lado, el consumo de energía aumenta en aproximadamente un 10%.

#### 4.7. Planteamiento de un modelo de regresión lineal múltiple de consumo

Partiendo de la figura 4.83, vamos a plantear una formulación para un modelo de regresión lineal múltiple para futuras aplicaciones y que plantee los parámetros de interés en base a las variables analizadas con anterioridad en esta tesis.

La figura 4.83 muestra de forma esquemática las dos cámaras de máquinas  $j_1$  y  $j_2$ . Los dos cuadros grises de la imagen representan los locales (cámaras) donde se encuentran los motores en parejas DG-1A, DG-1B y DG-2A, DG-2B.

Cada uno de ellos mueve un alternador (notados con la letra A seguida del nombre identificador del motor) que están acoplados a dos cuadros principales numerados

#### 4.7. PLANTEAMIENTO DE UN MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DE CONSUMO

CP-1 y CP-2. Desde estos tendremos la potencia disponible en el buque para alimentar los distintos consumidores del buque con las potencias  $P_1$  y  $P_2$ .

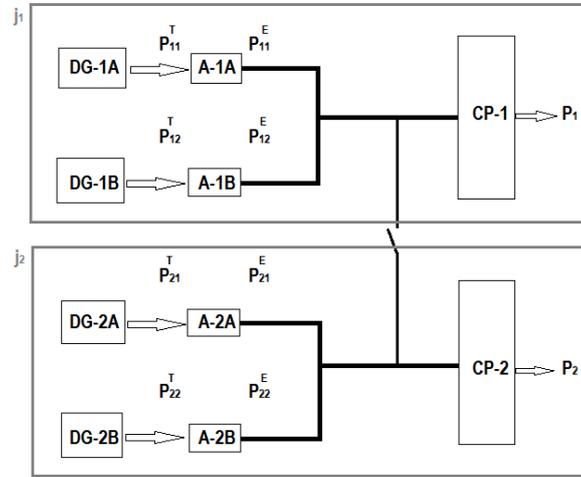


Figura 4.83: Esquema de planta de cuatro DD.GG. Elaboración propia (2017)

Cada DD.GG. consume combustible como energía potencial que transformará en calor y energía mecánica para mover sus componentes y el alternador. Esta última es la que se han enumerado como  $P_{ij}^T \forall (i, j) = 1, 2$ . De igual forma se han escrito las potencias eléctricas entregadas por los alternadores  $P_{ij}^E \forall (i, j) = 1, 2$ . La letra  $T$  hace referencia al par de giro y la letra  $E$  a la potencia eléctrica entregada al cuadro principal (CP-1, CP-2).

La formulación que plantearemos será como sigue, basándonos en el modelo de P. Erto 2015 [228] en el cual vamos a considerar los cuatro motores generadores en nuestro caso como la matriz  $Y$ , en esta consideramos los cuatro motores diésel separados en dos cámaras  $j_1, j_2$  y tendremos para cada caso la potencia entregada por cada una de las cámaras de generadores  $P_j^T$  y la potencia eléctrica generada  $P_j^E$ ; de igual forma consideraremos los coeficientes de rendimiento mecánico y eficiencia eléctrica  $\eta_j^m$  y  $\eta_j^E$  por lo que podemos expresar la potencia  $P_j$  como:

$$P_j = \frac{P_j^E}{\eta_j^E \cdot \eta_j^m} + \frac{P_j^T}{\eta_j^m} \quad (4.5)$$

En 4.6 podemos ver la consideración que haremos sobre la potencia  $P_{ij}$  siendo  $x_{ij}$  el factor de utilización de la planta.

$$P_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} = 0 \\ \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n}, & x_{ij} \in (0, 1] \end{cases} \quad (4.6)$$

el consumo de la planta energética lo podemos expresar según la relación siguiente:

$$Y = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 P_{ij} \cdot h_{ij} \cdot SFC_{ij} \quad (4.7)$$

Donde:

#### 4.7. PLANTEAMIENTO DE UN MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DE CONSUMO

---

$h_{ij}$ : es el tiempo de trabajo.

$SFC_{ij}$ : es el coeficiente de consumo específico.

Una aproximación del consumo se puede hacer en base a la resistencia hidrodinámica del buque  $R_H$  que es proporcional al cuadrado de la velocidad  $v$  del buque en superficie. Sabemos que la potencia necesaria para mover un barco es según la ecuación 2.8 un producto de la resistencia por la velocidad y así, podemos escribir en nuestro caso:

$$P_{ij} = R_T \times v \quad (4.8)$$

En una primera aproximación diremos que  $P_{ij} \propto v^3$  por lo que para  $Y$  se cumplirá también  $Y \propto v^3$ . Podemos establecer el siguiente modelo de regresión lineal para nuestro sistema energético sobre la base de la formulación de P. Erto (2015) para el consumo por milla navegada  $Q$ :

$$Q = \beta_0 + \beta_1 v^3 + \beta_2 \Delta + \beta_3 w_H + \beta_4 w_s + \beta_5 F + \beta_6 t_D + \beta_7 E + Z \quad (4.9)$$

En la ecuación 4.9 tenemos que:

$v^3$ : velocidad del buque sobre el agua.

$\Delta$ : desplazamiento del buque en toneladas.

$w_H$ : velocidad del viento en el sentido longitudinal.

$w_s$ : velocidad del viento en el sentido transversal.

$F$ : aumento de la resistencia por uso de aletas.

$t_D$ : tiempo acumulado en cada punto empezando el  $t_D = 0$

$E$ : modo de operación donde se considera RPM constantes es 0 y vale 1 cuando RPM no es constante.

$Z$ : error normal (Normal Random Error); si es 0 significa varianza desconocida ( $\sigma^2$ ).

La formulación de los errores residuales queda apoyada por el valor estándar residual del test de Anderson-Darling ( $p - value = 0,532 > 0,05$ ) y el test de Durbin-Watson ( $P - value = 0,330 > 0,05$ ). La comprobación de la adecuación del modelo creado con 4.9 viene dada por la expresión 4.7 y para el valor ajustado por 4.10:

$$R_A^2 = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i^\wedge)^2}{(n-q) \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} = 0,938 \quad (4.10)$$

En las expresiones anteriores 4.7 y 4.10  $\bar{Q}_i$  son los valores medios de consumo por milla navegada y los valores de regresión son los  $Q_i^\wedge$  que se calculan con la expresión 4.11.

$$Q_i^\wedge = \beta_0^\wedge + \beta_1^\wedge v_i^3 + \beta_2^\wedge \Delta_i + \beta_3^\wedge w_{H,i} + \beta_4^\wedge w_{s,i} + \beta_5^\wedge F_i + \beta_6^\wedge t_{D,i} + \beta_7^\wedge E_i \quad (4.11)$$

La varianza residual del modelo de P. Erto (2015) se expresa como 4.12:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_1)^2}{n - q} = 0,0065 \quad (4.12)$$

Los límites de predicción del modelo se pueden determinar para  $100(1 - \alpha)\%$  en base a 4.13:

$$Q_i^{\wedge} \pm t_{(\alpha/2),v} \sqrt{S_2(1 - X'(X^T \cdot X)^{-1}) \cdot X'^T} \quad (4.13)$$

Donde el valor  $(\frac{\alpha}{2}), v$  es  $100 \cdot \frac{\alpha}{2} - t_h$  con una distribución  $v = n - q$  grados de libertad en la que la matriz  $X'$  es  $(1, v'^2, \Delta', w'_H, w'_s, E', t'_D, E')$  y de igual forma tendremos que la matriz  $X$  es  $(1, v^3, \delta, w_H, w_s, E, t_D, E)$  construyendo matrices  $8 \times 8$ . Los valores de límites superior e inferior los escritos en 4.13. El uso del modelo se puede emplear como predictor del consumo y, por tanto, como determinador de las emisiones de  $CO_2$ . Con todo ello y, en base al error, podremos determinar un factor de consumo de combustible reducido para cada  $Q^{\wedge}_{t_D,k}$ ; en donde tomamos valores medios de tiempos para valores de viajes  $k = (1 \dots m)$ . En nuestro caso simplificaremos el modelo al tratarse de una planta solo de generación eléctrica y sólo atenderemos a las variables de velocidad del buque  $v$ , desplazamiento  $\Delta$ , modo de funcionamiento  $E$  y velocidad del viento  $w$  sin tener presente sus componentes. Así nuestro modelo simplificado queda como en 4.14:

$$Q = \beta_0 + \beta_1 v^3 + \beta_2 \Delta + \beta_3 w + \beta_6 t_D + \beta_7 E + Z \quad (4.14)$$

De esta forma las ecuaciones 4.7 a 4.13 tendrán que ser redefinidas para la nueva ecuación y comprobar así su validez. Escoger esta simplificación para el modelo de consumo reflejado en la ecuación 4.14 se hace por dos razones fundamentales:

1. Si bien nuestro buque tiene aletas, estas están siempre activas y en el exterior de la carena por tanto, considerarlas como en un buque porta contenedores no se hace ya que estos tiene la posibilidad de retraerlas al interior del casco para reducir la resistencia al avance y por tanto, en nuestro caso no es necesario.
2. Las consideraciones aerodinámicas son más importantes en un porta contenedores por la gran superficie que exponen al viento, en el caso del buque de guerra esta exposición es siempre la misma y se reduce al máximo por múltiples consideraciones, tanto aerodinámicas como de reducción de firma expuesta al radar.

La aplicación de este modelo y otros será una de las líneas de investigación que se abrirán a partir de la presentación de los resultados de esta tesis doctoral.

## 4.8. Conclusiones del capítulo

Queda constatado que los cálculos de situaciones de carga eléctrica para el buque en los distintos modos, no se corresponden con al realidad analizada en los casos estudiados. Además, el uso de la planta eléctrica de generación no tiene nada que ver con los criterios de diseño establecidos para cada uno de los modos de funcionamiento donde, en los modos en los que se marca un funcionamiento sobre

tres motores por ejemplo, se observa que generalmente el buque funciona con dos, lo que es indicativo de un uso manual de la planta.

En el análisis de correlaciones podemos destacar que se presenta claramente la existencia de correlación entre el consumo y el modo de funcionamiento. Así pues es conveniente dividir el análisis en base a los modos y las condiciones ambientales a la hora de estudiar las dependencias del consumo de la energía del buque, pero basando este en un análisis dinámico respecto del tiempo evitando el uso de horquillas amplias las cuales no reflejan la realidad de la variabilidad de los modos, situación global o variables cuantitativas como horarios o número de personas embarcadas.

El modo fondeado no tiene datos suficientes para hacer afirmación alguna sobre sus dependencias pero todo indica que al igual que el resto de modos, existe cierta relación con las condiciones ambientales y en concreto, con la temperatura de agua de mar.

Los gráficos de control son una excelente herramienta para el control de los procesos energéticos para mejorar la calidad de los mismos ya que, permiten la detección de fallos en el proceso que llevan asociada una variación del coste de utilización por el consumo de combustible además, sirven como herramienta para conocer tendencias y patrones de comportamiento del sistema buque en los distintos modos y condiciones ambientales.

Dependiendo de la capacidad de detección de los gráficos de control, en nuestro caso ha quedado demostrado que por las horquillas de variabilidad, los gráficos orientados a la detección de cambios pequeños no son los más aconsejados para la detección de situaciones fuera de control.

Los gráficos de control permitirán visualizar con respecto al tiempo y de forma dinámica la tendencia central y la dispersión de las variables implicadas en los distintos procesos del buque facilitando el registro continuo de datos, para el control de calidad, controlando las características que afectan al desempeño y por tanto al costo del proceso.

Del análisis de los gráficos de control podemos inferir el efecto de los modos, de las condiciones ambientales y de la geolocalización del buque. Vemos que las gráficas de control adquieren comportamientos parecidos según modos de operación combinada con la zona de navegación.

Si permitimos establecer requerimientos específicos en los cálculos del EEOI de buques como el estudiado, se puede llegar a la reducción de consumo de combustible de los buques y facilitará acometer mejoras de la EE que posteriormente pueden servir de base para futuros proyectos de buques como pueden ser las fragatas F-110 próximas a iniciar su construcción.

En el análisis de los valores de EEOI calculados para una batería de 72 viajes, observamos valores que se encuentran entre los límites inferior y superior de 40 y 80 respectivamente, constatándose que su valor depende fundamentalmente del tipo de propulsión que se emplee, subiendo su valor el uso de turbinas de gas y por otro lado la velocidad del buque, que aumenta la resistencia viscosa del casco con el agua y de la superestructuras con el aire.

El consumo de combustible de generación es mucho menor que el de combustible para la propulsión, pero al ser más predecible el consumo por estar influido por los modos de operación más que por otras variables, hace recomendable aplicar medidas de control del consumo y elementos tecnológicos como los de recuperación de calor en estos sistemas, además de, emplear este tipo de plantas en modo automáti-

#### 4.8. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

---

co sin intervención del ser humano en su funcionamiento.

El uso de modelos de regresión lineal sobre las variables que influyen en el consumo del buque pueden ser una buena herramienta tanto para mejorar los procesos de los buques existentes, como para la definición de los sistemas futuros que se embarquen en las nuevas unidades de la Armada y serán de gran ayuda en la digitalización de procesos en el entorno 4.0 de la Armada.

# Capítulo 5

## Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo presentamos las conclusiones finales de esta tesis basándonos, en primer lugar, en las conclusiones particulares de cada uno de los capítulos imbricando estas en un compendio final. De igual forma, tras las conclusiones, presentamos las posibles líneas futuras de trabajo e investigación que se consideran más necesarias en esta materia.

### 5.1. Conclusiones

Con la elaboración de esta tesis, hemos comprobado que los buques de guerra son sistemas altamente complejos en los que, el análisis dinámico de las variables implicadas en los procesos energéticos del buque, aportan mucha más información que los estudios estáticos tradicionalmente empleados en el diseño de los sistemas embarcados como pueden ser las plantas de generación o las de propulsión y, de igual forma, aportan una información muy valiosa para la gestión y operación de los mismos.

El estudio de las plantas encargadas de generación eléctrica del buque muestra que están sobredimensionadas cuando se emplean los criterios de obligado cumplimiento para la certificación y clasificación de las mismas así, vemos que los valores de diseño de las plantas según modos y estaciones climáticas tienen un valor máximo de 2.730 kW en la condición de operación (O.) en verano y un valor mínimo de 907 kW en la condición de puerto (P.E/P.A) también en verano.

Considerando valores de operación de la navegación de EE.UU. que es donde se agrupan la mayoría de los datos en este modo, vemos que el valor promedio de consumo fue de 1.308 kW, lo que representa algo más del 50% del valor empleado en el diseño; en el caso de las condiciones de puerto el valor promedio es de 608 kW, representando a su vez un 67% del estimado en el diseño.

De igual forma, en el trabajo de campo se ha constatado lo complejo y farragoso de las labores de recogida, clasificación, validación y análisis de los datos lo que recomienda, emplear software de la industria 4.0 para la toma, almacenamiento, transmisión, análisis y presentación de los datos con el fin de facilitar estas tareas e inferir el comportamiento de los sistemas embarcados y la interacción con la actividad humana a bordo.

Los gráficos de control son una excelente herramienta para el control de procesos energéticos en buques de guerra pudiendo mejorar la calidad de los mismos al permitir la detección de fallos en los procesos, conocer tendencias y elaborar patrones

de comportamiento de los sistemas embarcados. Los gráficos de control permitirán visualizar con respecto al tiempo de forma dinámica la tendencia central y la dispersión de las variables implicadas en los distintos procesos del buque, facilitando el registro continuo de datos para el control de calidad, ver el efecto de los modos, de las condiciones ambientales y de la localización del buque.

En definitiva, este estudio demuestra que la conjunción entre un sistema de captación de la información proveniente de los sistemas energéticos embarcados dentro del entorno de las tecnologías de la información (TI) actuales, unido a las técnicas y herramientas matemáticas más novedosas en el campo del control estadístico de procesos y la investigación operativa, abrirán la puerta de forma clara a la aparición del buque inteligente como sistema ciberfísico en el que la intervención humana sobre el mismo puede ser eliminada como meta 4.0.

### 5.2. Líneas futuras

Sobre estas conclusiones se hace necesario ahondar en las mejoras de la EE de los buques de guerra teniendo presente en primer lugar los sistemas embarcados, el tipo, la clase la serie y las variables que afectan a su funcionamiento, pero para ello es necesario adoptar una serie de decisiones en varios planos que faciliten la labor sobre la base de lo aquí analizado así, las líneas principales que se abren con esta tesis se orientan a mejoras en:

- Sistemas de monitorización de datos en tiempo real que permitan la captación de datos sobre las premisas de volumen alto de almacenamiento, velocidad de proceso y variedad de datos que permitan obtener bases de datos fiables y de calidad.
- Automatización de procesos evitando la intervención humana en la gestión de sistemas embarcados como pueden ser la plantas de generación eléctrica.
- Empleo de la IA para el proceso en tiempo real de la información extraída de las bases de datos que requerirá un trabajo matemático importante en desarrollo de algoritmos de auto-aprendizaje autónomo, independientes de factores como las reacciones de los usuarios y operadores de los sistemas.

# Bibliografía

- [1] Roger Fouquet. Lessons from energy history for climate policy: technological change, demand and economic development. *Energy Research & Social Science*, 22:79–93, 2016.
- [2] Franziska Christina Paul. Deep entanglements: History, space and (energy) struggle in the german energiewende. *Geoforum*, 91:1–9, 2018.
- [3] Jaime González Velasco. *Energías renovables*. Reverté, 2009.
- [4] *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, 1997.
- [5] Kadir Amasyali and Nora M El-Gohary. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:1192–1205, 2018.
- [6] D. Andrews. The conflict between ship design and procurement policies. In *Warship 2018 Procurement Future Surface Vessels. (RINA proceedings)*, 2018.
- [7] Dorian Brefort, Colin Shields, Agnieta Habben Jansen, Etienne Duchateau, Rachel Pawling, Koen Droste, Ted Jasper, Michael Sypniewski, Conner Goodrum, Mark A. Parsons, et al. An architectural framework for distributed naval ship systems. *Ocean Engineering*, 147:375–385, 2018.
- [8] Enrique Casanova Rivas. *El buque de guerra como aplicación más avanzada de la tecnología naval*. Fondo Editorial de Ingeniería Naval, Colegio Oficial de Ingenieros Navales, 1996.
- [9] Azucena Ramírez, Jhoan Joseph Anuvis, Chicas Rivas, José Elam, and Wendy Elizabeth Romero Sarmiento. *Estudio para el ahorro de energía eléctrica en el Campus Central de la Universidad de El Salvador, elaboración de proyectos de eficiencia energética*. PhD thesis, Universidad de El Salvador, 2015.
- [10] Robert G. Bednarik. The earliest evidence of ocean navigation. *International Journal of Nautical Archaeology*, 26(3):183–191, 1997.
- [11] Robert G. Bednarik. Maritime navigation in the lower and middle palaeolithic. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 328(8):559–563, 1999.
- [12] Graciela Gestoso Singer. El intercambio de materias primas y bienes de prestigio entre egipto y los estados de mesopotamia (siglos XV y XIV a.C). *Aula orientalis: revista de estudios del Próximo Oriente Antiguo*, 24(2):189–211, 2006.

- [13] Flavio Vegecio Renato. *Instituciones militares*. Juaqvin Ibarra, 1764.
- [14] Vicente Rodríguez Casado. La política del reformismo de los primeros borbones en la marina de guerra española. *Anuario de Estudios Americanos*, 25:601–618, 1968.
- [15] José Luis Casado Soto. Barcos para la guerra. Soporte de la Monarquía Hispánica. *Cuadernos de Historia Moderna*, 2006.
- [16] R. López Miranda. *Metalurgia para técnicos*. Tipografía Faro de Vigo, 1964.
- [17] Pedro Linares Llamas. Eficiencia energética y medio ambiente. *Economía y medioambiente*. ICE, 2009.
- [18] L. Gutiérrez Jodrá. España y la energía: un punto de vista académico. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 100:83–103, 2006.
- [19] Allan J Kuethe and José Manuel Serrano Álvarez. El astillero de la Habana y Trafalgar. *Revista de Indias*, 241, 2007.
- [20] Enrique Casanova Rivas. *Máquinas para la propulsión de buques*. Universidade da Coruña, 2001.
- [21] Carlos Barrionuevo Ojeda. *Introducción a las plantas de propulsión*. ESUP, 2013.
- [22] MAN Diesel Turbo. Hybrid propulsion flexibility and maximum efficiency optimally combined. *MAN*, 2018.
- [23] Daniel Segura Dávila. Análisis de la instalación de un sistema de propulsión híbrido en un buque de practicaaje. Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [24] Marcos Salas. Ingeniería avanzada para economía de combustible en pesqueros. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 23(3), 2010.
- [25] José M. de Juan García Aguado. *Principios de teoría del buque: dinámica*. Universidade da Coruña, Servicio de Publicacions, 1993.
- [26] Anthony F Molland, Stephen R Turnock, and Dominic A Hudson. *Ship resistance and propulsion*. Cambridge university press, 2017.
- [27] Javier Castillo Rioja. Diseño del cuadro principal de distribución y generación de energía eléctrica de un buque pesquero. *UCA*, 2010.
- [28] Aparicio Florido and Juan de Dios. Propulsión y servicios del buque. *UCA*, 2012.
- [29] Moisés Vázquez Millán. Diseño del cuadro principal de un pesquero tanguero. *UCA*, 2013.
- [30] Iván Peral Pérez. Diseño de la instalación eléctrica de un petrolero para transporte de crudo. *UPC*, 2013.

- [31] Malay Pal. Ship work breakdown structures through different ship lifecycle stages. *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*, 2015.
- [32] NAVSEA. DDS-310. Technical report, Department of the Navy, 2012.
- [33] Matías Andrés Machicote, Rodolfo Santiago Morello, and Sebastián Nuñez. Guía y análisis económico de la implementación de ISO 50001 en la sede ITBA–parque patricios. *Universidad ITBA*, 2017.
- [34] Rosa Ibiza Estruch. *Estudio para la implantación de un sistemas de gestión medioambienta (EMAS) en centrales hortofrutícolas de cítricos y estrategia empresarial sostenible*. PhD thesis, UPV, 2014.
- [35] Kara Hoffmann and Karsten Menzel. A guideline for the implementation of an energy management system in facility management organisations. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 887, pages 247–254. Trans Tech Publ, 2019.
- [36] Dexma. *ISO 50001: ¿qué es y cómo la implemento en mi empresa. La Guía Completa sobre la Norma ISO 50001 para empresas que quieren ahorrar energía*. DEXMA, Marie Curie, 8-14 08042, Barcelona, 1 edition, enero 2016.
- [37] Reza Ziarati, Zakirul Bhuiyan, Germán de Melo Rodríguez, and Heikki Koivisto. Maritime energy management system (mariems) online delivery platform. In *IAMU18 AGA2017*, pages 255–264, 2017.
- [38] Aykut I. Ölçer and Fabio Ballini. Energy management in the maritime industry. In *Corporate social responsibility in the maritime industry*, pages 131–148. Springer, 2018.
- [39] Unión Europea. Directiva 2012/27/ue del parlamento europeo y del consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las directivas 2009/125/ce y 2010/30/ue, y por la que se derogan las directivas 2004/8/ce y 2006/32/ce texto pertinente a efectos del eee. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 2012.
- [40] MINETUR- IDAE. Plan nacional de Eficiencia Energética 2014 - 2020. Technical report, Gobierno de España, 2014.
- [41] Cayetano Marín. La energía eólica en España. *Investigaciones geográficas*, nº 35; pp. 45-65, 2004.
- [42] Lourdes García Montoro. Objetivo 2020: de la eficiencia energética a los edificios de consumo de energía casi nulo. *Revista CESCO de Derecho de Consumo*, 2016.
- [43] Fernando Martín-Consuegra, Agustín Hernández-Aja, Ignacio Oteiza, and Carmen Alonso. Distribución de la pobreza energética en la ciudad de Madrid (España). *Revista EURE-Revista de Estudios Urbano Regionales*, 45(135), 2019.

- [44] Peter M. Swartz and Karin Duggan. The US Navy in the World (1991-2000): Context for US Navy capstone strategies and concepts. Technical report, DTIC Document, 2012.
- [45] N.H. Doerry, T.J. McCoy, and T.W. Martin. Energy and the affordable future fleet. *USN*, 2010.
- [46] Željka Primorac. Legal challenges of implementing the system of monitoring carbon dioxide emissions from maritime transport within ports of call under the jurisdiction of eu member states. *Pomorstvo*, 32(1):3–9, 2018.
- [47] International Maritime Organization. Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques (MARPOL). Technical report, IMO, 1983.
- [48] International Maritime Organization. MEPC 63 guidance on best practices for fuelefficient operation for ships. Technical report, IMO, 1997.
- [49] International Maritime Organization. MEPC 70/18. amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating there to inclusion of regulations on energy efficiency for ships in marpol annex vi. Technical report, IMO, 2011.
- [50] Diario Oficial de la Unión Europea. Reglamento (ue) 2015/757 del parlamento europeo y del consejo de 29 de abril de 2015 relativo al seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por el transporte marítimo. Technical report, U.E., 2015.
- [51] NATO. ANEP-41. Technical report, Allied Naval Engineer Publication, 2006.
- [52] Javier Pastor Sánchez. Estimación del coste del ciclo de vida de un sistema de armas en España. *Revista del Instituto Español de Estudios Estratégicos*, 2015.
- [53] International Maritime Organization. MEPC.245(66). guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (eedi) for new ships. Technical report, IMO, 2014.
- [54] International Maritime Organization. Orientaciones para la elaboración de un plan de gestión de la eficiencia energética del buque. Technical report, IMO, 2009.
- [55] International Maritime Organization. Report of the marine environment protection committee (MEPC) on its sixty-second session, 203 (62), annex 19. Technical report, IMO, 2011.
- [56] Marine Environment Protection Committee. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency operational indicator (eeoi), international maritime organization. Technical report, IMO, 2009.
- [57] Antonio Liarte Pérez, Pedro Carrasco Pena, María Elena Arce Fariña, Andrés Suárez García, and Laura Vitalia González Martínez. Eficiencia energética: traslación y aplicación práctica de la normativa civil a buques de guerra. *V Congreso Nacional de Seguridad y Defensa*, 2017.

- [58] Pedro Carrasco Pena, Raquel González, Guillermo Rey, Elena Arce, David González-Peña, and Cristina Alonso-Tristán. Combatants fuel consumption analysis and energy efficiency improvements. In *XI National and II International Engineering Thermodynamics Congress*, pages 732–738, 06 2019.
- [59] Alfonso I López-Díaz, Miguel Ángel Gutiérrez-García, Diego González-Aguilera, Alejandro Morales-Sánchez, and Jaime Ruiz-Martí. Las TIC navegando hacia la sostenibilidad económica y ambiental en el transporte marítimo. *Dyna*, 83(197):187–193, 2016.
- [60] Victor N. Armstrong and Charlotte Banks. Integrated approach to vessel energy efficiency. *Ocean Engineering*, 110:39–48, 2015.
- [61] ABS. Ship energy efficiency measures: Status and guidance. Technical report, American Bureau of Shipping, 2013.
- [62] Francesco Baldi. Improving ship energy efficiency through a systems perspective. *Department of Shipping and Marine Technology*, 2013.
- [63] Xiao Liang et al. Hull lines reliability-based optimisation design for minimum EEDI. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 69(2):17–33, 2018.
- [64] Xide Cheng, Baiwei Feng, Zuyuan Liu, and Haichao Chang. Hull surface modification for ship resistance performance optimization based on delaunay triangulation. *Ocean Engineering*, 153:333–344, 2018.
- [65] Karsten Hochkirch and Volker Bertram. Engineering options for more fuel efficient ships. In *Proceedings of First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency*, volume 1, 2010.
- [66] Takafumi Kawamura, Kazuyuki Ouchi, and Takeo Nojiri. Model and full scale CFD analysis of propeller boss cap fins (PBCF). *Journal of marine science and technology*, 17(4):469–480, 2012.
- [67] Tho Quang Truong, Ping-Chen Wu, Kaoru Aoyagi, Kenta Koike, Yu Akiyama, Yasuyuki Toda, et al. The EFD and CFD study of rudder-bulb-fin system in ship and propeller wake field of KVLCC2 tanker in calm water. In *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017.
- [68] Jun Hou, Ziyou Song, Hyeongjun Park, Heath Hofmann, and Jing Sun. Implementation and evaluation of real-time model predictive control for load fluctuations mitigation in all-electric ship propulsion systems. *Applied Energy*, 230:62–77, 2018.
- [69] MS. Selim, MA. Shenashen, Sherif A. El-Safty, SA. Higazy, MM. Selim, H. Isago, and A. Elmarakbi. Recent progress in marine foul-release polymeric nanocomposite coatings. *Progress in Materials Science*, 87:1–32, 2017.
- [70] Roar Adland, Pierre Cariou, Haiying Jia, and Francois-Charles Wolff. The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning. *Journal of Cleaner Production*, 178:1–13, 2018.

- [71] Bárbara Alcayde Romo. Estudio de viabilidad de velas de nueva generación para buques. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [72] Aritz Ortega García et al. Análisis de la utilización de energías renovables en buques. *Universidad de Cantabria*, 2018.
- [73] Robert Løseth, Geir Sekkesæter, and Sverre Valsgård. Economics of high-tensile steel in ship hulls. *Marine Structures*, 7(1):31–50, 1994.
- [74] Gequn Shu, Youcai Liang, Haiqiao Wei, Hua Tian, Jian Zhao, and Lina Liu. A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19:385–401, 2013.
- [75] Dig Vijay Singh and Eilif Pedersen. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy conversion and management*, 111:315–328, 2016.
- [76] Ulrik Larsen, Tuong-Van Nguyen, Thomas Knudsen, and Fredrik Haglund. System analysis and optimisation of a Kalina split-cycle for waste heat recovery on large marine diesel engines. *Energy*, 64:484–494, 2014.
- [77] Lorenzo Pigani, Marco Boscolo, and Nicola Pagan. Marine refrigeration plants for passenger ships: Low-gwp refrigerants and strategies to reduce environmental impact. *International Journal of Refrigeration*, 64:80–92, 2016.
- [78] Danang Cahyagi and Eddy S Koenhardono. Study of shipboard power distribution system: Review on an application of ac zonal distribution. *IPTEK Journal of Engineering*, 4(1), 2018.
- [79] Maricruz AF Cepeda and Newton Narciso Pereira. The use of low carbon technology in maritime industry as alternatives to climate change. *Conference Paper*, 2018.
- [80] Daniel Mueller, Stefanie Uibel, Masaya Takemura, Doris Klingelhofer, and David A Groneberg. Ships, ports and particulate air pollution-an analysis of recent studies. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 6(1):31, 2011.
- [81] Francesc Xavier Martínez de Osés and Mihaela Sin. Improvement of the energy efficiency of vessels as a measure for the reduction of greenhouses gases emission from sea shipping. *Journal of marine technology and environment*, 1(IV, 1/2011):103–112, 2011.
- [82] Kyunghwa Kim, Kido Park, Jaehoon Lee, Kangwoo Chun, and Seok-Hyun Lee. Analysis of battery/generator hybrid container ship for co 2 reduction. *IEEE Access*, 6:14537–14543, 2018.
- [83] DG Trodden and M Haroutunian. Effects of ship manoeuvring motion on no x formation. *Ocean Engineering*, 150:234–242, 2018.
- [84] Tony R Walker, Olubukola Adebambo, MC Del Aguila Feijoo, Elias Elhaimer, Tahazzud Hossain, Stuart Johnston Edwards, and S Zomorodi. Environmental effects of marine transportation. *World Seas: An Environmental Evaluation*, 2018.

- [85] Francesco Baldi, Ulrik Larsen, and Cecilia Gabriellii. Comparison of different procedures for the optimisation of a combined diesel engine and organic rankine cycle system based on ship operational profile. *Ocean Engineering*, 110:85–93, 2015.
- [86] R Zaccone, E Ottaviani, M Figari, and M Altosole. Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation: A dynamic programming approach. *Ocean Engineering*, 153:215–224, 2018.
- [87] Safaa AJ Alfayyadh. Development of the framework for a lean, energy efficient, and environmentally friendly port: umm qasr port as a case study. *World Maritime University Ph.D. Dissertations*, 2017.
- [88] CG Hodge and DJ Mattick. The electric warship. *Trans IMarE*, 108(Part 2):109–125, 1996.
- [89] Justin Stepanchick. *Integrating Model Based Engineering and trade space exploration into naval acquisitions*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2016.
- [90] Justin Stepanchick and Alan Brown. Revisiting DDGX/DDG-51 concept exploration. *Naval Engineers Journal*, 119(3):67–88, 2007.
- [91] Ronald O’Rourke. Navy ship propulsion technologies: Options for reducing oil use. In *CRS Report for Congress*. DTIC Document, 2006.
- [92] Scott C. Buchanan. Energy and force transformation. Technical report, NATIONAL DEFENSE UNIV WASHINGTON DC INST FOR NATIONAL STRATEGIC STUDIES, 2006.
- [93] Juan Rico Palma. La eficiencia energética y la gestión ambiental en la armada. *Revista general de marina*, 261(2):335–348, 2011.
- [94] Alaina M. Chambers and Steve A. Yetiv. The great green fleet: The us navy and fossil-fuel alternatives. Technical report, NAVAL WAR COLLEGE NEWPORT RI, 2011.
- [95] Salvatore Greco, J Figueira, and M Ehrgott. *Multiple criteria decision analysis*. Springer, 2016.
- [96] Ivy B Huang, Jeffrey Keisler, and Igor Linkov. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the total environment*, 409(19):3578–3594, 2011.
- [97] Violeta Motuzienė, Artur Rogoža, Vilūnė Lapinskienė, and Tatjana Vilutienė. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 112:532–541, 2016.
- [98] Abhishek Kumar, Bikash Sah, Arvind R Singh, Yan Deng, Xiangning He, Praveen Kumar, and RC Bansal. A review of multi criteria decision making (mcdm) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69:596–609, 2017.

- [99] María Elena Arce Fariña, Ángeles Saavedra, José L Míguez, and Enrique Granada. The use of grey-based methods in multi-criteria decision analysis for the evaluation of sustainable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47:924–932, 2015.
- [100] Jiang-Jiang Wang, You-Yin Jing, Chun-Fa Zhang, and Jun-Hong Zhao. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9):2263–2278, 2009.
- [101] Tien Anh Tran. Optimization of the energy efficiency operational indicator for M/V NSU Justice 250,000 DWT by grey relational analysis method in vietnam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, page 1475090217748756, 2017.
- [102] José P. Monteagudo Yanes and Oscar Geovany Gaitan. Herramientas para la gestión energética empresarial. *Scientia et technica*, 3(29):169–174, 2005.
- [103] Marta Monzón Chavarrías et al. *Metodología para la obtención de indicadores de vulnerabilidad física de viviendas desde la perspectiva de la priorización de su rehabilitación integral el caso de los conjuntos de viviendas sociales de la posguerra de Zaragoza*. PhD thesis, Universidad de Zaragoza, 2016.
- [104] Alvaro Hernán Restrepo. Gestión total eficiente de la energía: herramienta fundamental en el mejoramiento de la productividad de las empresas. *Scientia et technica*, 1(21), 2003.
- [105] Carlos Andrés Pérez and Flaminio Vera Méndez. Indicadores de gestión enfocados al ahorro energético para la industria de beneficio de feldespato. *Scientia et technica*, 16(49), 2011.
- [106] Carolina Salazar Aragón, Edson de Olivera Pamplona, and Juan Ricardo Vidal Medina. La eficiencia energética como herramienta de gestión de costos: una aplicación para la identificación de inversiones de en eficiencia energética, su evaluación económica y de riesgo. *Revista Digital del Instituto Internacional de Costos*, 2012.
- [107] Alejandro Quintela Del Rio. *El Estadístico Accidental*. Lulu. com, 2013.
- [108] A Hueso and J Cascant. Cuadernos docentes en proceso de desarrollo. *Metodologías y Técnicas Cuantitativas de la Investigación, Primera*, 2012.
- [109] Carlos Hernández Pedrera and Filipe Da Silva Portofilipe. Aplicación del control estadístico de procesos (cep) en el control de su calidad. *Tecnología Química*, 36(1):104–116, 2016.
- [110] JC Benneyan, RC Lloyd, and PE Plsek. Statistical process control as a tool for research and healthcare improvement. *BMJ Quality & Safety*, 12(6):458–464, 2003.
- [111] Albert Prat Bartés. *Métodos estadísticos. Control y mejora de la calidad*, volume 1. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica, 2005.

- [112] K Muralidharan. Six sigma process. In *Six Sigma for Organizational Excellence*, pages 39–48. Springer, 2015.
- [113] Kim M Henderson and James R Evans. Successful implementation of six sigma: benchmarking general electric company. *Benchmarking: An International Journal*, 7(4):260–282, 2000.
- [114] Quintana Alicia Esther, Pisani María Virginia, and Casal Ricardo Néstor. Desempeño de cartas de control estadístico con límites bilaterales de probabilidad para monitorear procesos weibull en mantenimiento. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(1):143–156, 2015.
- [115] R González Falcón, D Velázquez Alonso, LM Gallego Fernández, and Luis Pérez-Lombard. Improving energy efficiency in a naphtha reforming plant using six sigma methodology. *Fuel processing technology*, 103:110–116, 2012.
- [116] Peter S Pande, Robert P Neuman, and Roland R Cavanagh. *The six sigma way: How GE, Motorola, and other top companies are honing their performance*. McGraw-Hill (New York), 2000.
- [117] George Eckes. *El six sigma para todos*. Editorial Norma, 2006.
- [118] Thomas Pyzdek and Paul A. Keller. *The six sigma handbook*, volume 4. McGraw-Hill Education New York, NY, 2014.
- [119] Benjamin W. Niebel, Andris Freivalds, and Marcia A González Osuna. *Métodos, estándares y diseño del trabajo*. Alfaomega, 2004.
- [120] José Manuel Pardo Álvarez and José Manuel. *Configuración y usos de un mapa de procesos*. AENOR-Asociación Española de Normalización y Certificación, 2012.
- [121] Kaoru Ishikawa and Kaoru Ishikawa. *Guide to quality control*, volume 2. Asian Productivity Organization Tokyo, 1982.
- [122] Ioannis S. Arvanitoyannis and Theodoros H. Varzakas. Application of failure mode and effect analysis (FMEA), cause and effect analysis and pareto diagram in conjunction with HACCP to a potato chips manufacturing plant. *International journal of food science & technology*, 42(12):1424–1442, 2007.
- [123] Mohammad S. Owlia. Quality in higher education-a survey. *Total Quality Management*, 7(2):161–172, 1996.
- [124] ATD Perera, RA Attalage, KKCK Perera, and VPC Dassanayake. A hybrid tool to combine multi-objective optimization and multi-criterion decision making in designing standalone hybrid energy systems. *Applied energy*, 107:412–425, 2013.
- [125] Jay L. Devore. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Cengage Learning Editores, 2008.
- [126] Eyda Lucía Marín Ramírez. Evaluación de estrategias docentes universitarias: una aplicación práctica del control estadístico de procesos en estudios de empresas. *Tesis Doctoral*, 2016.

- [127] Arturo Ruiz-Falcó Rojas. Control estadístico de procesos. *Universidad Pontificia, Madrid*, 2006.
- [128] Walter Andrew Shewhart. *Economic control of quality of manufactured product*. ASQ Quality Press, 1931.
- [129] E. S. PAGE. Continuous inspection schemes. *Biometrika*, 41(1-2):100–115, 1954.
- [130] Omar Ruiz Barzola. *Gráficos de control de calidad multivariantes con dimensión variable*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [131] George A Barnard. Control charts and stochastic processes. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pages 239–271, 1959.
- [132] SW. Roberts. Control chart tests based on geometric moving averages. *Technometrics*, 1(3):239–250, 1959.
- [133] John F. MacGregor and Theodora Kourti. Statistical process control of multivariate processes. *Control Engineering Practice*, 3(3):403–414, 1995.
- [134] Cynthia A. Lowry and Douglas C. Montgomery. A review of multivariate control charts. *IIE transactions*, 27(6):800–810, 1995.
- [135] Cristina Barbiero, M. Flury, Alberto Pagura, Marta Quaglino, and Marta Ruggieri. Control estadístico de procesos multivariados mediante gráficos de control multivariados  $t^2$  de hotelling, mewma y mcusum. *Octavas jornadas investigaciones en la Facultad de Ciencias Económicas y Estadística, Instituto de Investigaciones Teóricas y Aplicada, Escuela de Estadística*, page 12, 2003.
- [136] Ebrahim Mazrae Farahani, Reza Baradaran Kazemzadeh, Rassoul Noorossana, and Ghazaleh Rahimian. A statistical approach to social network monitoring. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 46(22):11272–11288, 2017.
- [137] Harold Hotelling. Multivariate quality control. *Techniques of statistical analysis*, 1947.
- [138] Carmen Huerga Castro, Pilar Blanco Alonso, and Julio Abad González. Aplicación de los gráficos de control en el análisis de la calidad textil. *Pecunia: Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de León*, 1(1):125–148, 2005.
- [139] Edgar Augusto Ruelas Santoyo, Bertha Laura Vargas Rodríguez, José Jovani Cardiel Ortega, and Geraldo Llamas Perez. Análisis del gráfico de control multivariante  $t^2$  de hotelling mediante la red neuronal artificial fuzzy artmap. *DYNA Ingeniería e Industria*, 93(1):21, 2018.
- [140] Andrés Eduardo Plaza Rodas. Diseño de gráficos de control multivariantes basado en la combinación lineal de variables normales. *Universidad del País Vasco*, 2017.

- [141] Rubén Godino López. Mejora del mantenimiento mediante el uso de gráficos multivariantes. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2018.
- [142] Francisco Aparisi and J Carlos GARCIA. Aumento de la potencia del gráfico de control multivariante  $t^2$  de hotelling utilizando señales adicionales de falta de control. *Estadística española*, 43(148):171–188, 2001.
- [143] Aida Magdalena Contreras Zamarrón, Eduardo Marroquín Prado, and Federico Zertuche Luis. Monitoreo y control de un proceso normal multivariado. *Conciencia Tecnológica*, 1(43):29–35, 2012.
- [144] Carlos David Olmedo Amaya. Análisis del proceso de ensamblaje y propuesta de mejoras del servicio de garantía en la compañía sistemas y servicios erazoca. Thesis, Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Industrial, 2014.
- [145] Daniel Felipe Bermeo Tapia. Análisis y propuesta de mejora para el control del proceso de microcrédito en la fundación alternativas para el desarrollo, organización no gubernamental perteneciente a la economía popular y solidaria del ecuador. Master's thesis, PUCE, 2014.
- [146] Elsy Guadalupe Hernández Vázquez. *Aplicación del control estadístico a la variable crítica temperatura en una empresa acerera*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2009.
- [147] Davida M. Amsden, Howard E. Butler, and Robert T. Amsden. Attributes control charts. In *SPC Simplified for Services*, pages 137–172. Springer, 1991.
- [148] Miguel Alfonso Flores Sánchez. Desarrollo de una aplicación para gráficos de control de calidad de procesos industriales. Master's thesis, ESPAÑA/Facultad de Matemáticas-Universidad de La Coruña/2013, 2013.
- [149] Equipo CAIGG et al. Documento técnico n° 75: Técnicas y herramientas para el control de procesos y la gestión de la calidad, para su uso en la auditoría interna y en la gestión de riesgos. *Gobierno de Chile*, 2015.
- [150] Krishna B. Misra. *Handbook of performability engineering*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [151] Amitava Mitra. *Fundamentals of quality control and improvement*. John Wiley & Sons, 2016.
- [152] Esmeralda Ramírez-Méndez and Mario Cantú-Sifuentes. Carta de control para procesos multinomiales: estudio de desempeño. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(1):67–74, 2017.
- [153] David R. Anderson, Dennis J. Sweeney, Thomas A. Williams, María del Carmen Hano Roa, and Teresa López Álvarez. *Estadística para administración y economía*. International Thomson, 2001.
- [154] Ronald Aylmer Fisher. *The design of experiments*. Oxford, 1935.
- [155] Elssy Bonilla-Castro and Penélope Rodríguez Sehk. *Más allá del dilema de los métodos: la investigación en ciencias sociales*. Editorial Norma, 2005.

- [156] Felipe Pardinás. *Metodología y técnicas de investigación en ciencias sociales*. Siglo XXI, 1989.
- [157] Fred Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5):533–549, 1986.
- [158] Alba Fernández Hernández et al. Algoritmos heurísticos y metaheurísticos basados en búsqueda local aplicados a problemas de rutas de vehículos. *Universidad de Valladolid*, 2016.
- [159] Santiago Rúa Batanero. Desarrollo de un heurístico para la asignación de tareas y la generación de rutas del proceso de auditoría de las tiendas de un operador de telefonía. *UPM*, 2018.
- [160] Anton Beloglazov, Jemal Abawajy, and Rajkumar Buyya. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for cloud computing. *Future generation computer systems*, 28(5):755–768, 2012.
- [161] Anton Beloglazov and Rajkumar Buyya. Optimal online deterministic algorithms and adaptive heuristics for energy and performance efficient dynamic consolidation of virtual machines in cloud data centers. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 24(13):1397–1420, 2012.
- [162] A. Vidal-Esmorís. Algoritmos heurísticos en optimización. *Universidad de Santiago de Compostela. Master en Técnicas Estadísticas*, 2013.
- [163] Diego Alberto Oliva Navarro. *Aplicación de algoritmos metaheurísticos en procesamiento de señales, imágenes y energías alternativas*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2015.
- [164] Ricardo Alberto Hincapié Isaza, Ramón Alfonso Gallego Rendón, and Carlos Alberto Ríos Porras. Técnicas heurísticas aplicadas al problema del cartero viajante (tsp). *Scientia et Technica*, 1(24):1–6, 2004.
- [165] Sergio Alonso, Oscar Córdón, I Fernández, and Francisco Herrera. La metaheurística de optimización basada en colonias de hormigas: modelos y nuevos enfoques. *Optimización inteligente: técnicas de inteligencia computacional para optimización*, pages 261–314, 2004.
- [166] M. Rajkumar, P. Asokan, Tom Page, and Subramanian Arunachalam. A grasp algorithm for the integration of process planning and scheduling in a flexible job-shop. *International Journal of Manufacturing Research*, 5(2):230–251, 2010.
- [167] Pilar Moreno Díaz and Jesús Sánchez Allende. Revisión de algoritmos de búsqueda aplicadas al problema de creación de calendarios de exámenes. *Tecnología y desarrollo*, 15, 2017.
- [168] Alfredo G. Hernández-Díaz, Flor M. Guerrero Casas, Rafael Caballero Fernández, and Julián Molina Luque. Algoritmo tabú para un problema de distribución de espacios//tabu search algorithm for a room allocation problem. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 1:25–37, 2016.

- [169] Jesús del Carmen Peralta Abarca, Jazmín Yanel Juárez Chávez, and Beatriz Martínez Bahena. Aplicaciones de recocido simulado en problemas de optimización combinatoria. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 11(23):23–28, 2015.
- [170] Rui Zhang and Raymond Chiong. Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: a multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 112:3361–3375, 2016.
- [171] Sergio Ernesto Tostado Sánchez, Manuel Ornelas Rodríguez, Andrés Espinal Jiménez, and Héctor J Puga Soberanes. Implementación de algoritmos de inteligencia artificial para el entrenamiento de redes neuronales de segunda generación. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1):6–10, 2016.
- [172] Ruihua Lu, Osman Turan, and Evangelos Boulougouris. Voyage optimisation: Prediction of ship specific fuel consumption for energy efficient shipping. In *Low Carbon Shipping Conference*, volume 44, pages 1–11, 2013.
- [173] Diego Alberto Oliva Navarro. Aplicación de algoritmos metaheurísticos en procesamiento de señales, imágenes y energías alternativas. *Universidad Complutense de Madrid*, 2015.
- [174] Cristian Peñaranda Cebrián. *Aplicación de Técnicas Soft Computing y Heurísticas para la identificación y clasificación de la información empleada por un recomendador de recetas*. PhD thesis, UPV, 2015.
- [175] John Holland. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with application to biology. *Control and artificial intelligence*, 1975.
- [176] Lawrence Davis. Handbook of genetic algorithms. *CUMINCAD*, 1991.
- [177] Abdullah Konak, David W Coit, and Alice E Smith. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(9):992–1007, 2006.
- [178] Kenneth Alan De Jong. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems. *The University of Michigan*, 1975.
- [179] Francisco J Velasco González, Teresa M Rueda Rodríguez, Eloy López García, Emiliano Moyano Pérez, and José Luis Nanclares López. Aplicación del control qft robusto a la maniobra de cambio de rumbo de un buque. *Automática*, 2003.
- [180] José Luis del Val Román. Industria 4.0: la transformación digital de la industria. *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto (CODDII)*, 2016.
- [181] Luis R Izquierdo, José Manuel Galán Ordax, José I Santos, and Ricardo Del Olmo Martínez. Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de metodología de ciencias sociales*, 2008.

- [182] María Victoria Caballero Pintado. *Herramientas para la no linealidad*. PhD thesis, Universidad de Murcia, 2015.
- [183] Ibán Naveros Mesa. *Análisis y evaluación energética de sistemas constructivos ventilados a partir de datos experimentales medidos en condiciones reales de uso y utilizando métodos de análisis de series temporales*. Universidad de Granada, 2014.
- [184] Jorge Enrique Garcés Cano and Edison Jair Duque Oliva. Grupos estratégicos en la banca colombiana: análisis estático y dinámico. *Revista Innovar Journal Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 18(32):195–226, 2008.
- [185] Guillermo Rey González. *Análisis de comportamiento de sistemas energéticos complejos mediante simulación dinámica*. PhD thesis, Universidade de Vigo, 2016.
- [186] Adolfo Figueroa. Estática y dinámica en el análisis económico. *Economía*, pages 9–32, 1993.
- [187] Carles M Cuadras. *Nuevos métodos de análisis multivariante*. CMC Editions Barcelona, 2007.
- [188] P Štěpánek, P Zahradníček, and A Farda. Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the czech republic in the period 1961–2010. *Időjárás*, 117(1):123–141, 2013.
- [189] Charu C. Aggarwal. *An introduction to outlier analysis*. Springer, 2013.
- [190] Pedro Jesús Carrasco Pena, María Elena Arce Fariña, Javier Martínez Torres, and Raquel González Fernández. Eficiencia energética en buques de guerra: un caso práctico. *VI Congreso Nacional de i+d en seguridad y defensa*, 2016.
- [191] Yolanda Piñeiro Redondo. *Simulación de Monte Carlo de sistemas complejos en red*. Univ Santiago de Compostela, 2007.
- [192] R Carrasco, P Fernández de Córdoba, L García-Raffi, and J Sanchís. Métodos de simulación monte carlo y sus aplicaciones. *Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia*, 2000.
- [193] Nicholas Metropolis, Arianna W Rosenbluth, Marshall N Rosenbluth, Augusta H Teller, and Edward Teller. Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6):1087–1092, 1953.
- [194] USN-NAVSEA. Navsea 0938-lp-018-0010: Manual de criterios de proyecto. Technical report, USN, 2000.
- [195] Oficina Técnica. Manual de ventilación, calefacción y aire acondicionado. Technical report, Astilleros Navantia, 2011.
- [196] NAVANTIA. *Sistema Integrado de Control de Plataforma*. SEPI, SISTEMAS-FABA, 1 edition, junio 2010.

- [197] NATO. MIL-DTL-16884M, detail specification: Fuel, naval distillate. online, agosto 2012.
- [198] Abraham Silberschatz, Henry F. Korth, S. Sudarshan, Fernando Sáenz Pérez, Antonio Ibarra Santiago, and Antonio Vaquero Sánchez. *Fundamentos de bases de datos*. McGraw-Hill, 2006.
- [199] Chris J. Date. *Introducción a los sistemas de bases de datos*. Pearson Educación, 2001.
- [200] David M. Kroenke. *Procesamiento de bases de datos: fundamentos, diseño e implementación*. Pearson Educación, 2003.
- [201] Ángel Cobo. *Diseño y programación de bases de datos*. Editorial Visión Libros, 2007.
- [202] Mark Mitchell, B. Muftakhidinov, T. Winchen, and Z. Jędrzejewski-Szmek. Engauge digitizer software. *Webpage: <http://markummitchell.github.io/engauge-digitizer>*. Accessed, 11, 2017.
- [203] M. Mitchell. Engauge digitizer. a free open-source software to extract data points from a graph image. *Hosted on SourceForge at <http://digitizer.sourceforge.net>*, 2002.
- [204] Francisco Javier Cárcel Carrasco and Carlos Roldán Porta. Principios básicos de la gestión del conocimiento y su aplicación a la empresa industrial en sus actividades tácticas de mantenimiento y explotación operativa: Un estudio cualitativo. *Intangible capital*, 9(1):91–125, 2013.
- [205] Piergiorgio Corbetta. *Metodología y técnicas de investigación social*. Mcgraw-hill, 2007.
- [206] Internationa Energy Agency (IEA). *Indicadores de Eficiencia Energética: Fundamentos Estadísticos*. OECD, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France, 1 edition, enero 2016.
- [207] Veronica Chaidez, Denis Dreano, Susana Agusti, Carlos M Duarte, and Ibrahim Hoteit. Decadal trends in red sea maximum surface temperature. *Scientific reports*, 7(1):8144, 2017.
- [208] Hitoshi Kume. *Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad*. Editorial Norma, 1992.
- [209] James R Evans, William M Lindsay, Francisco Sánchez Fragoso, and Guillermo Haaz Díaz. *Administración y control de la calidad*. E. Paraninfo, 2000.
- [210] H Besterfield Dale. Control de calidad. *Ed. Diaz de Santos. Madrid*, 1994.
- [211] ONU. Convención de las naciones unidas sobre el derecho del mar. *Organización de Naciones Unidas*, 1994.
- [212] Alba et al. Alday Ruedo. *Propulsión naval con turbinas de gas*. UPV/UHE, 2014.

- [213] José Adrián Rodríguez Ponce. *Sistemas de propulsión y clasificación de buques*. ULL, 2015.
- [214] Görkem Kkkülünk and Adnan Parlak. An alternative energy efficiency index offer to reduce co2 emissions from ships: Fleet energy efficiency management index. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 7(1):127–136, 2017.
- [215] Tien Anh Tran. A research on the energy efficiency operational indicator eeo calculation tool on m/v nsu justice of vinic transportation company, vietnam. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2(1):55–60, 2017.
- [216] Nicoleta Acomi and Ovidiu Cristian Acomi. Improving the voyage energy efficiency by using EEOI. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 138:531–536, 2014.
- [217] Nicoleta Acomi and OC Acomi. The effect of early berthing prospects on the energy efficiency operational index in oil tanker vessels. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2016.
- [218] Kai Wang, Xinping Yan, Yupeng Yuan, Xiaoli Jiang, Xiao Lin, and Rudy R. Negenborn. Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62:685–698, 2018.
- [219] José A. Orosa, Ángel M Costa, and José A. Pérez. A new modelling procedure of the engine room ventilation system for work risk prevention and energy saving. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(4):863–870, 2017.
- [220] John Edward Akin. *Finite element analysis concepts: via SolidWorks*. World Scientific Publishing Company, 2010.
- [221] Yousef Saad. *Iterative methods for sparse linear systems*, volume 82. siam, 2003.
- [222] Lewis Fry Richardson. Ix. the approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 210(459-470):307–357, 1911.
- [223] Patrick J. Roache. *Verification and validation in computational science and engineering*. Hermosa, 1998.
- [224] Patrick J. Roache, Kirti N. Ghia, and Frank M. White. Editorial policy statement on the control of numerical accuracy. *Journal of Fluids Engineering*, 108(1):2–2, 1986.
- [225] Mauro De Marchis, Gabriele Freni, and Enrico Napoli. Three-dimensional numerical simulations on wind-and tide-induced currents: The case of augusta harbour (italy). *Computers & geosciences*, 72:65–75, 2014.

- [226] RA. Falconer, Y. Guoping, and G. YU. Effects of depth, bed slope and scaling on tidal currents and exchange in a laboratory scale model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 91(3):561–576, 1991.
- [227] Ming-xiao Xie and Wei Zhang. Numerical study on the three-dimensional characteristics of the tidal current around harbor entrance. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 22(6):847–855, 2010.
- [228] Pasquale Erto, Antonio Lepore, Biagio Palumbo, and Luigi Vitiello. A procedure for predicting and controlling the ship fuel consumption: its implementation and test. *Quality and Reliability Engineering International*, 31(7):1177–1184, 2015.