



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Estudio para la descarbonización del sistema eléctrico de potencia de la isla de El Hierro mediante el uso de hidrógeno como vector energético

MEMORIA PRESENTADA POR:

Vicente Sanz Ródenas

TUTOR:

Pedro Ángel Blasco Espinosa

COTUTOR:

Francisco José Huerta Arráez

GRADO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Convocatoria de defensa: *Julio del 2021*

<< Si tuviera la suerte de alcanzar alguno de mis ideales, sería en nombre de toda la humanidad. >>

Nikola Tesla.



[Esta obra está bajo una licencia Creative commons "Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Agradecimientos:

A todos los profesores que han sabido potenciar mis habilidades como futuro profesional.

A mis tutores por haber sido mi guía y mi estímulo durante la redacción del TFG.

A mis compañeros/as de carrera por todos los momentos vividos.

A mí familia por su apoyo incondicional.

Resumen:

El presente trabajo final de carrera se centra en el análisis del sistema eléctrico de potencia de la Isla de El Hierro y en el estudio de las tecnologías maduras de los sistemas estacionarios de pilas de combustible, para la generación de energía eléctrica por medio del hidrógeno.

El análisis de la red eléctrica de la Isla permitirá: conocer su comportamiento, entender las fluctuaciones de la red originadas por la inconstancia de las energías renovables y cuantificar de forma aproximada la energía en forma de hidrógeno necesaria.

A lo largo del TFG se plantean los siguientes desafíos, ¿Qué pasaría a día de hoy, si se sustituyese el diésel por hidrógeno? y ¿Qué le hace falta a la tecnología del hidrógeno para ser mínimamente competitiva con el diésel?

La propuesta solución eliminará las emisiones de gases de efecto invernadero en la generación de energía, mejorará la calidad de la energía eléctrica y permitirá la integración del hidrógeno en otros sectores.

PALABRAS CLAVE

SISTEMA
ELÉCTRICO
POTENCIA
ENERGÍA
HIDRÓGENO

Abstract:

This Degree Final Project focuses on the analysis of the electrical power system of the island of El Hierro and the study of mature technologies of stationary fuel cell systems for the generation of electrical energy by means of hydrogen.

The analysis of the island's electrical network will allow: knowing its behavior, understanding the fluctuations in the network caused by the inconstancy of renewable energies and approximately quantifying the necessary energy in the form of hydrogen.

Throughout the TFG the following challenges are exposed: What would happen today, if diesel were replaced by hydrogen? And what does hydrogen technology need to be minimally competitive with diesel?

The proposed solution will eliminate greenhouse gas emissions in power generation, improve the quality of electrical energy and allow the integration of hydrogen in other sectors.

KEYWORDS

ELECTRICAL
POWER
SYSTEM
ENERGY
HYDROGEN

Resum

El present treball final de carrera es centra en l'anàlisi de el sistema elèctric de potència de la Illa de El Hierro i en l'estudi de les tecnologies madures dels sistemes estacionaris de piles de combustible, per a la generació d'energia elèctrica per mitjà de l'hidrogen.

L'anàlisi de la xarxa elèctrica de l'illa permetrà: conèixer el seu comportament, entendre les fluctuacions de la xarxa originades per la inconstància de les energies renovables i quantificar de manera aproximada l'energia en forma d'hidrogen necessària.

Al llarg del TFG es plantegen els següents reptes, Què passaria a dia d'avui, si es substituís el dièsel per hidrogen? i Què li cal a la tecnologia de l'hidrogen per a ser mínimament competitiva amb el dièsel?

La proposta solució eliminarà les emissions de gasos d'efecte hivernacle en la generació d'energia, millorarà la qualitat de l'energia elèctrica i permetrà la integració de l'hidrogen en altres sectors.

PARAULES CLAU

SISTEMA
ELÈCTRIC
POTÈNCIA
ENERGIA
HIDROGEN

Índice general:

ORDEN DEL CONTENIDO

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	II
Abstract.....	III
Resum.....	IV
Índice general.....	V
Lista de tablas.....	VI
Lista de imágenes.....	VII
1 Introducción.....	1
1.1 Motivaciones y justificación.....	1
1.2 Objetivos del trabajo final de grado.....	2
1.3 Objetivos personales.....	3
1.4 Asignaturas de la carrera aplicadas.....	4
1.5 Competencias transversales del trabajo final de grado.....	31
2 Transición energética.....	34
2.1 Transición energética y cambio climático.....	34
2.2 Panorama Nacional.....	37
2.3 Panorama Europeo.....	41
2.4 ¿Por qué apostar por el hidrógeno?.....	48
3 Situación de la isla de El Hierro.....	54
3.1 ¿Por qué la isla de El Hierro?.....	54
3.2 Descripción de la Isla de El Hierro.....	57
3.3 Espacios naturales.....	58
3.4 Plan Energético de Canarias 2006-2015.....	59
4 Determinación del Sistema Eléctrico de Potencia de la Isla de El Hierro.....	62
4.1 Definición general de sistemas de energía eléctrica.....	62
4.2 Generación de energía en la isla de El Hierro.....	63
4.2.1 Central Hidroeléctrica Gorona del Viento.....	63
4.2.1.1 Características del parque Eólico.....	64
4.2.1.2 Características de la central Hidráulica.....	65
4.2.1.3 Características de la estación de bombeo.....	66
4.2.1.4 Estimación del rendimiento global.....	66

4.2.2 Central térmica Llanos Blancos.....	69
4.2.2.1 Características de los grupos generadores.....	69
4.2.2.2 Características del sistema de almacenaje.....	73
4.3 Red de distribución de la isla de El Hierro.....	74
4.3.1 Corredor eléctrico.....	78
4.3.2 Longitudes de las líneas.....	79
4.3.3 Parámetros eléctricos de las líneas.....	80
4.4 Distribución del consumo instantáneo de la isla de El Hierro.....	80
5 Generalidades previas al modelado del SEP.....	85
5.1 Sistema por unidad.....	85
5.1.1 Valores base.....	85
5.1.2 Valores por unidad.....	86
5.1.2.1 Impedancias de línea.....	86
6 Diseño de la simulación.....	88
6.1 Introducción al Power World.....	88
6.2 Configuraciones previas.....	89
6.3 Pasos y guía de diseño.....	90
6.3.1 Buses.....	90
6.3.2 Líneas.....	90
6.3.3 Cargas.....	90
6.3.4 Generadores.....	91
6.4 Modelado final.....	91
7 Casos de estudio del SEP de la isla de El Hierro.....	92
7.1 Criterios previos.....	92
7.2 Casos de estudio en red mallada.....	93
7.2.1 Red mallada de la isla.....	94
7.2.1.1 Caso nº1 M.....	95
7.2.1.2 Caso nº2 M.....	97
7.2.1.3 Caso nº3 M.....	99
7.2.1.4 Caso nº4 M.....	101
7.2.1.5 Caso nº5 M.....	103
7.2.1.6 Caso nº6 M.....	105
7.2.1.7 Caso nº7 M.....	107
7.2.1.8 Caso nº8 M.....	109
7.2.1.9 Caso nº9 M.....	111
7.3 Casos de estudio en red radial.....	113
7.3.1 Red radial de la isla.....	113
7.3.1.1 Caso nº1 R.....	114
7.3.1.2 Caso nº4 R.....	116
7.3.1.3 Caso nº7 R.....	118
7.4 Conclusiones globales de las 2 topologías.....	120
8 Consumos máximos y mínimos instantáneos por mes de todo el año 2019.....	121

9 Energía eólica disponible para el año 2019.....	123
10 Proporción de fuentes de energía para el año 2019 que abastecen el consumo eléctrico.....	126
11 Microcortes en el suministro y calidad de la energía eléctrica 2016-2019.....	128
11.1 Consideraciones previas.....	128
11.2 Microcortes en el año 2019.....	129
11.3 Microcortes en el año 2018.....	130
11.4 Microcortes en el año 2017.....	131
11.5 Microcortes en el año 2016.....	132
11.6 Conclusiones obtenidas.....	133
12 Legislación referente a la calidad de suministro eléctrico.....	134
13 Cuantificación de la energía de origen fósil para su sustitución por hidrógeno....	138
13.1 Criterios previos.....	138
13.2 Generación instantánea promedio mensual, marzo del 2019.....	139
13.3 Generación instantánea promedio mensual, agosto del 2019.....	140
13.4 Generación instantánea promedio mensual, diciembre del 2019.....	141
13.5 Conclusiones obtenidas.....	142
13.6 Cálculos de energía aproximados.....	143
14 Almacenamiento de hidrógeno.....	144
14.1 Estado del arte en almacenamiento de hidrógeno.....	144
14.2 Dimensionado teórico del almacenamiento.....	145
14.2.1 Gas hidrógeno a 700 bar.....	145
14.2.2 Hidrógeno líquido.....	148
14.2.3 Diesel Oil.....	149
14.2.4 Comparativa de combustibles y sistemas de almacenamiento.....	150
14.3 ¿Qué le hace falta a la tecnología del almacenamiento de hidrógeno para ser competitiva con el diésel?.....	152
15 Pilas de combustible de hidrógeno.....	155
15.1 Estado del arte en pilas de combustible de hidrógeno.....	155
15.2 Dimensionado teórico de las pilas de combustible.....	160
15.2.1 Pila de combustible alcalina (AFC).....	161
15.2.2 Pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC).....	162
15.2.3 Comparativa de las pilas de combustible.....	163
15.3 ¿Qué le hace falta a la tecnología de pilas de combustible de hidrógeno para ser competitiva con el diésel?.....	163
16 Emisiones de gases de efecto invernadero.....	166
17 Aspectos de seguridad y normativa en infraestructuras de hidrógeno.....	168
18 Conclusiones finales del estudio.....	179
19 Bibliografía y webgrafía.....	181

Lista de tablas:

Tabla 1.4_01: Matemáticas I.....	5
Tabla 1.4_02: Competencias Matemáticas I.....	5
Tabla 1.4_03: Física.....	5
Tabla 1.4_04: Competencias Física.....	5
Tabla 1.4_05: Competencias Transversales Física.....	6
Tabla 1.4_06: Electricidad.....	6
Tabla 1.4_07: Competencia Electricidad.....	6
Tabla 1.4_08: Competencias Transversales Electricidad.....	6
Tabla 1.4_09: Expresión Gráfica.....	7
Tabla 1.4_10: Competencias Expresión Gráfica.....	7
Tabla 1.4_11: Competencias Transversales Expresión Gráfica.....	7
Tabla 1.4_12: Informática.....	7
Tabla 1.4_13: Competencias Informática.....	8
Tabla 1.4_14: Competencias Transversales Informática.....	8
Tabla 1.4_15: Química.....	8
Tabla 1.4_16: Competencias Química.....	9
Tabla 1.4_17: Competencias Transversales Química.....	9
Tabla 1.4_18: Ciencia de Materiales.....	9
Tabla 1.4_19: Competencias Ciencia de Materiales.....	9
Tabla 1.4_20: Máquinas y Mecanismos.....	10
Tabla 1.4_21: Competencias Máquinas y Mecanismos.....	10
Tabla 1.4_22: Competencias Transversales Máquinas y Mecanismos.....	10
Tabla 1.4_23: Circuitos Eléctricos.....	10
Tabla 1.4_24: Competencias Circuitos Eléctricos.....	11
Tabla 1.4_25: Competencias Transversales Circuitos Eléctricos.....	11
Tabla 1.4_26: Matemáticas II.....	11
Tabla 1.4_27: Competencias Matemáticas II.....	12
Tabla 1.4_28: Competencias Transversales Matemáticas II.....	12
Tabla 1.4_29: Estadística.....	12
Tabla 1.4_30: Competencias Estadística.....	13
Tabla 1.4_31: Competencias Transversales Estadística.....	13
Tabla 1.4_32: Resistencia de Materiales.....	13
Tabla 1.4_33: Competencias Resistencia de Materiales.....	13
Tabla 1.4_34: Competencias Transversales Resistencia de Materiales.....	14
Tabla 1.4_35: Mecánica de Fluidos.....	14
Tabla 1.4_36: Competencias Mecánica de Fluidos.....	14
Tabla 1.4_37: Competencias Transversales Mecánica de Fluidos.....	15
Tabla 1.4_38: Termodinámica y Transmisión de Calor.....	15
Tabla 1.4_39: Competencias Termodinámica y Transmisión de Calor.....	15
Tabla 1.4_40: Competencias Transversales Termodinámica y Transmisión de Calor.....	16
Tabla 1.4_41: Máquinas Eléctricas.....	16
Tabla 1.4_42: Competencias Máquinas Eléctricas.....	16
Tabla 1.4_43: Competencias Transversales Máquinas Eléctricas.....	16
Tabla 1.4_44: Sistemas de Producción Industrial.....	17

<i>Tabla 1.4_45: Competencias Sistemas de Producción Industrial.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 1.4_46: Competencias Transversales Sistemas de Producción Industrial.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 1.4_47: Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 1.4_48: Competencias Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 1.4_49: Competencias Transversales Sist. Eléct. Trifásicos y Régimen Transitorio... </i>	<i>18</i>
<i>Tabla 1.4_50: Tecnología Medioambiental.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 1.4_51: Competencias Tecnología Medioambiental.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 1.4_52: Competencias Transversales Tecnología Medioambiental.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 1.4_53: Ampliación de Máquinas Eléctricas.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1.4_54: Competencias Ampliación de Máquinas Eléctricas.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1.4_55: Competencias Transversales Ampliación de Máquinas Eléctricas.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1.4_56: Líneas Eléctricas y Transporte de Energía Eléctrica.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 1.4_57: Competencias Líneas Eléctricas y Transporte de Energía Eléctrica.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 1.4_58: Competencias Transversales Líneas Eléct. y Transporte de Energía Eléct... </i>	<i>21</i>
<i>Tabla 1.4_59: Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.4_60: Competencias Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.4_61: Competencias Transversales Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 1.4_62: Sistemas Eléctricos de Potencia.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 1.4_63: Competencias Sistemas Eléctricos de Potencia.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 1.4_64: Oficina Técnica.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 1.4_65: Competencias Oficina Técnica.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 1.4_66: Competencias Transversales Oficina Técnica.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 1.4_67: Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 1.4_68: Competencias Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 1.4_69: Competencias Transversales Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 1.4_70: Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 1.4_71: Competencias Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 1.4_72: Competencias Transversales Control de Máquinas.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 1.4_73: Energías renovables.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 1.4_74: Competencias Energías renovables.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 1.4_75: Competencias Transversales Energías renovables.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 1.4_76: Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 1.4_77: Competencias Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 1.4_78: Electrificación Urbanística.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 1.4_79: Competencias Electrificación Urbanística.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 1.4_80: Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 1.4_81: Competencias Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 1.4_82: Domótica.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 1.4_83: Competencias Domótica.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 1.5_01: Competencias transversales.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 1.5_02: Competencias transversales con asignaturas.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2.2_01: Grasshopper-grid assisting modular hydrogen pem power plant.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 2.2_02: Desarrollo de un ecosistema de H₂ en la isla mallorca (green hysland).....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 2.2_03: Grasshopper-grid assisting modular hydrogen pem power plant.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 2.3_01: Heavenn H₂ energy applications in Northern Netherlands.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 2.3_02: HOASIS.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2.4_01: Los números del hidrógeno.....</i>	<i>49</i>

<i>Tabla 2.4_02: Transporte y distribución del hidrógeno.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 2.4_03: Empleo España PTE HPC 2030-3035.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 4.2.1.2_01: Características conducciones.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_01: Tabla resumen de grupos generadores.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_02: Motor Diésel LD 7.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_03: Motor Diésel LD 9.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_04: Motor Diésel LD 9.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_05: Motor Diésel LD 11.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_06: Motor Diésel LD 12.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_07: Motor Diésel LD 13.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_08: Motor Diésel LD 14.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_09: Motor Diésel LD 15.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_10: Motor Diésel LD 16.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4.2.2.1_11: Motor Diésel móvil 1.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 4.3_01: Designación y las características de los conductores.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 4.3.2_01: Longitud de los tramos.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4.3.3_01: Parámetros eléctricos de las líneas.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.4_01: Porcentaje de la población sobre toda la isla.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 4.4_02: Estimación de potencia activa y reactiva.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 5.1.1_01: Valores base.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 5.1.2.1_01: Impedancias de línea por unidad.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 7.2_01: Casos de estudio Red Mallada.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 7.2.1.1_01: Consumos Caso nº1 M.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 7.2.1.2_01: Consumos Caso nº2 M.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 7.2.1.3_01: Consumos Caso nº3 M.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 7.2.1.4_01: Consumos Caso nº4 M.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 7.2.1.5_01: Consumos Caso nº5 M.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 7.2.1.6_01: Consumos Caso nº6 M.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 7.2.1.7_01: Consumos Caso nº7 M.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 7.2.1.8_01: Consumos Caso nº8 M.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 7.2.1.9_01: Consumos Caso nº9 M.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 7.3.1.1_01: Consumos Caso nº1 R.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 7.3.1.2_01: Consumos Caso nº4 R.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 7.3.1.3_01: Consumos Caso nº7 R.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 7.4_01: Pérdidas totales de la red.....</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 9_01: Promedios cuando la isla puede o no, abastecerse por sí sola.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 10_01: Resumen datos proporción de fuentes de energía y días 2019.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 11.6_01: Duración y energía de los casos estudiados.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 12_01: Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 12_02: Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 12_03: Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre.....</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 13.2_01: Generación instantánea promedio mensual, marzo del 2019.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 13.3_01: Generación instantánea promedio mensual, agosto del 2019.....</i>	<i>140</i>
<i>Tabla 13.2_01: Generación instantánea promedio mensual, diciembre del 2019.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 14.1_01: Hidruros metálicos.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 14.2.1_01: Equivalencias hidrógeno AeH2.....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 14.2.1_02: Factores de compresibilidad AeH2.....</i>	<i>146</i>

<i>Tabla 14.2.2_01: Equivalencias del hidrógeno AeH2.....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 14.2.3_01: Energía a almacenar frente a energía a producir.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 14.2.4_01: Comparativa de combustibles y formas de almacenamiento.....</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 14.3_01: Resumen de las características de distintos tipos de electrolizadores.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 15.1_01: Phosphoric acid fuel cell.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 15.1_02: Solid metal oxide fuel cell.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 15.1_03: Molten carbonate fuel cell.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 15.2.1_01: ALKALINE FUEL CELL (AFC).....</i>	<i>161</i>
<i>Tabla 15.2.2_01: PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC).....</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 15.2.3_01: Tecnologías de pilas de combustible.....</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 16_01: Coste del derecho de emisión.....</i>	<i>166</i>
<i>Tabla 17_01: Directivas Atex.....</i>	<i>168</i>
<i>Tabla 17_02: Tabla resumen equipos de protección.....</i>	<i>170</i>
<i>Tabla 17_03: Clasificación de sustancias y temperaturas de llama.....</i>	<i>171</i>
<i>Tabla 17_04: Modos de protección para equipos eléctricos.....</i>	<i>171</i>
<i>Tabla 17_05: Aislamientos en conductores ATEX.....</i>	<i>174</i>

Lista de imágenes:

<i>Imagen 2.1_01: Millones de toneladas de CO₂ Sistema Eléctrico Español 2007-2019.....</i>	<i>35</i>
<i>Imagen 2.1_02: Toneladas de CO₂ emitidas por cada MWh generado 2019.....</i>	<i>35</i>
<i>Imagen 2.2_01: TRL/MRL Niveles tecnológicos.....</i>	<i>37</i>
<i>Imagen 2.3_01: Funciones del H₂ para la descarbonización</i>	<i>41</i>
<i>Imagen 2.3_02: Tecnologías de almacenamiento de energía.....</i>	<i>42</i>
<i>Imagen 2.3_03: Escenario objetivo España 2030.....</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 2.3_04: Res curtailment Alemania 2017.....</i>	<i>43</i>
<i>Imagen 2.3_05: Plantas de producción de H₂ en Europa.....</i>	<i>44</i>
<i>Imagen 2.3_06: Planta PEM 2 MW, Yingkou, China.....</i>	<i>46</i>
<i>Imagen 2.4_01: Elemento hidrógeno de la tabla periódica y molécula de H₂.....</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 2.4_02 : Colores del hidrógeno.....</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 2.4_03 : CertifHy.....</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 2.4_04: Potencial renovables, Unión Europea, Fundación Naturgy.....</i>	<i>53</i>
<i>Imagen 3.1_01: Archipiélago Canario.....</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 3.1_02: Potencia Eléctrica E.E.R.R 2018.....</i>	<i>55</i>
<i>Imagen 3.1_03: Integración de E.E.R.R. en usos finales mediante hidrógeno.....</i>	<i>56</i>
<i>Imagen 3.1_04: Esquema objeto TFG (Hydrogen Council).....</i>	<i>56</i>
<i>Imagen 3.2_01: Geología de El Hierro.....</i>	<i>57</i>
<i>Imagen 3.2_02: Clima de El Hierro.....</i>	<i>57</i>
<i>Imagen 3.2_03: Biodiversidad de El Hierro.....</i>	<i>57</i>
<i>Imagen 3.2_04: Municipios de El Hierro.....</i>	<i>57</i>
<i>Imagen 3.4_01: Agrupación de objetivos PECAN 2006-2015 (elaboración propia).....</i>	<i>59</i>
<i>Imagen 3.4_02: Previsión del consumo final de energía eléctrica El hierro.....</i>	<i>61</i>
<i>Imagen 4.2_01: Gorona del Viento.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 4.2_02: Llanos blancos.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 4.2.1_01: Parque Eólico.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 4.2.1_02: Central Hidráulica.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 4.2.1_03: Estación de bombeo.....</i>	<i>63</i>
<i>Imagen 4.2.1.1_01: Características Parque Eólico.....</i>	<i>64</i>
<i>Imagen 4.2.1.1_02: PDS-3_EOLICO.....</i>	<i>64</i>
<i>Imagen 4.2.1.2_01: Depósito superior.....</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 4.2.1.2_02: Depósito inferior.....</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 4.2.1.2_03: Conducciones.....</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 4.2.1.2_04: Turbinas Pelton.....</i>	<i>65</i>
<i>Imagen 4.2.1.3_01: Características de la estación de bombeo.....</i>	<i>66</i>
<i>Imagen 4.2.2_01: Vista completa Central Llanos Blancos.....</i>	<i>69</i>
<i>Imagen 4.2.2.1_01: Interior Central Llanos Blancos.....</i>	<i>73</i>
<i>Imagen 4.2.2.2_01: Sistema de almacenamiento de combustibles y aceites.....</i>	<i>74</i>
<i>Imagen 4.3_01: PIS-1_EL_SISTEMA_ACTUAL.....</i>	<i>75</i>
<i>Imagen 4.3_02: Estructura del apoyo.....</i>	<i>76</i>
<i>Imagen 4.3.1_01: Corredor Eléctrico Isla de El hierro Mem_OrdenaciónEH.....</i>	<i>78</i>
<i>Imagen 4.4_01: Red de distribución a simular.....</i>	<i>84</i>
<i>Imagen 4.4_02: PIS-2_DEMANDA_ENERGETICA.....</i>	<i>84</i>
<i>Imagen 6.1_01: Web del programa Power World.....</i>	<i>88</i>

<i>Imagen 6.2_01: Default drawings values for new objects 1</i>	89
<i>Imagen 6.2_02: Default drawings values for new objects 2</i>	89
<i>Imagen 6.3.1_01: Configuración de los BUSES</i>	90
<i>Imagen 6.3.2_01: Configuración de LÍNEAS</i>	90
<i>Imagen 6.3.3_01: Configuración de las CARGAS</i>	90
<i>Imagen 6.3.4_01: Configuración de los GENERADORES</i>	91
<i>Imagen 6.4_01: Modelo del SEP de la isla</i>	91
<i>Imagen 7.2.1_01: Red de distribución (Mallada)</i>	94
<i>Imagen 7.2.1.1_01: Caso nº1 M</i>	95
<i>Imagen 7.2.1.1_02: Caso nº1 M simulación</i>	96
<i>Imagen 7.2.1.1_03: Caso nº1 M datos obtenidos</i>	96
<i>Imagen 7.2.1.2_01: Caso nº2 M</i>	97
<i>Imagen 7.2.1.2_02: Caso nº2 M simulación</i>	98
<i>Imagen 7.2.1.2_03: Caso nº2 M datos obtenidos</i>	98
<i>Imagen 7.2.1.3_01: Caso nº3 M</i>	99
<i>Imagen 7.2.1.3_02: Caso nº3 M simulación</i>	100
<i>Imagen 7.2.1.3_03: Caso nº3 M datos obtenidos</i>	100
<i>Imagen 7.2.1.4_01: Caso nº4 M</i>	101
<i>Imagen 7.2.1.4_02: Caso nº4 M simulación</i>	102
<i>Imagen 7.2.1.4_03: Caso nº4 M datos obtenidos</i>	102
<i>Imagen 7.2.1.5_01: Caso nº5 M</i>	103
<i>Imagen 7.2.1.5_02: Caso nº5 M simulación</i>	104
<i>Imagen 7.2.1.5_03: Caso nº5 M datos obtenidos</i>	104
<i>Imagen 7.2.1.6_01: Caso nº6 M</i>	105
<i>Imagen 7.2.1.6_02: Caso nº6 M simulación</i>	106
<i>Imagen 7.2.1.6_03: Caso nº6 M datos obtenidos</i>	106
<i>Imagen 7.2.1.7_01: Caso nº7 M</i>	107
<i>Imagen 7.2.1.7_02: Caso nº7 M simulación</i>	108
<i>Imagen 7.2.1.7_03: Caso nº7 M datos obtenidos</i>	108
<i>Imagen 7.2.1.8_01: Caso nº8 M</i>	109
<i>Imagen 7.2.1.8_02: Caso nº8 M simulación</i>	110
<i>Imagen 7.2.1.8_03: Caso nº8 M datos obtenidos</i>	110
<i>Imagen 7.2.1.9_01: Caso nº9 M</i>	111
<i>Imagen 7.2.1.9_02: Caso nº9 M simulación</i>	112
<i>Imagen 7.2.1.9_03: Caso nº9 M datos obtenidos</i>	112
<i>Imagen 7.2.1_01: Red de distribución (Radial)</i>	113
<i>Imagen 7.3.1.1_01: Caso nº1 R</i>	114
<i>Imagen 7.3.1.1_02: Caso nº1 R simulación</i>	115
<i>Imagen 7.3.1.1_03: Caso nº1 R datos obtenidos</i>	115
<i>Imagen 7.3.1.2_01: Caso nº4 R</i>	116
<i>Imagen 7.3.1.2_02: Caso nº4 R simulación</i>	117
<i>Imagen 7.3.1.4_03: Caso nº4 R datos obtenidos</i>	117
<i>Imagen 7.3.1.3_01: Caso nº7 R</i>	118
<i>Imagen 7.3.1.3_02: Caso nº7 R simulación</i>	119
<i>Imagen 7.3.1.3_03: Caso nº7 R datos obtenidos</i>	119
<i>Imagen 8_01: Consumos máximos y mínimos por mes de todo el año 2019</i>	122
<i>Imagen 9_01: Velocidad del viento frente a días del año 2019</i>	124

<i>Imagen 10_01: Porcentaje de días del año según fuentes de energía.....</i>	<i>127</i>
<i>Imagen 11.2_01: Microcortes 2019.....</i>	<i>129</i>
<i>Imagen 11.3_01: Microcortes 1 2018.....</i>	<i>130</i>
<i>Imagen 11.3_02: Microcortes 2 2018.....</i>	<i>130</i>
<i>Imagen 11.4_01: Microcortes 1 2017.....</i>	<i>131</i>
<i>Imagen 11.4_02: Microcortes 2 2017.....</i>	<i>131</i>
<i>Imagen 11.5_01: Microcortes 2 2016.....</i>	<i>132</i>
<i>Imagen 11.5_02: Microcortes 2 2016.....</i>	<i>132</i>
<i>Imagen 13.2_01: Generación instantánea promedio mensual marzo 2019.....</i>	<i>140</i>
<i>Imagen 13.3_01: Generación instantánea promedio mensual agosto 2019.....</i>	<i>141</i>
<i>Imagen 13.4_01: Generación instantánea promedio mensual diciembre 2019.....</i>	<i>142</i>
<i>Imagen 14.2.1_01: Diagrama de compresibilidad para el H₂.....</i>	<i>146</i>
<i>Imagen 14.2.4_01: H₂ a 700 bar.....</i>	<i>151</i>
<i>Imagen 14.2.4_02: H₂ líquido.....</i>	<i>151</i>
<i>Imagen 14.2.4_03: H₂ en mina de sal.....</i>	<i>151</i>
<i>Imagen 14.2.4_04: H₂ en tubo volcánico.....</i>	<i>151</i>
<i>Imagen 14.3_01: Coste del H₂ para diferentes tecnologías de producción.....</i>	<i>152</i>
<i>Imagen 14.3_02: Coste del gas natural, Opex y Capex para Europa.....</i>	<i>152</i>
<i>Imagen 14.3_03: Captura de dióxido de carbono.....</i>	<i>153</i>
<i>Imagen 15.1_01: Eficiencia vs t^a para Máquinas térmicas y electroquímicas Ariema S.L.....</i>	<i>156</i>
<i>Imagen 15.1_02: Pasos energéticos Ariema S.L.....</i>	<i>156</i>
<i>Imagen 15.1_03: Comportamiento eléctrico de una celda de combustible.....</i>	<i>157</i>
<i>Imagen 15.2_01: Sistema estacionario AFC del orden de MW de potencia instalada.....</i>	<i>160</i>
<i>Imagen 15.3_01: Propuesta de estación de trabajo.....</i>	<i>164</i>
<i>Imagen 15.3_02: Partes de una pila PEM.....</i>	<i>164</i>
<i>Imagen 15.3_03: PEMFC System cost.....</i>	<i>165</i>
<i>Imagen 15.3_04: Cost system per year PEMFC.....</i>	<i>165</i>
<i>Imagen 16_01: Coste del derecho de emisión.....</i>	<i>167</i>
<i>Imagen 16_02: Emisiones de CO₂.....</i>	<i>167</i>
<i>Imagen 17_01: Triángulo de la combustión.....</i>	<i>169</i>
<i>Imagen 17_02: Pentágono del fuego.....</i>	<i>169</i>
<i>Imagen 17_03: Fuentes de ignición.....</i>	<i>169</i>
<i>Imagen 17_04: Motor no zona ATEX.....</i>	<i>172</i>
<i>Imagen 17_05: Motor en zona ATEX.....</i>	<i>172</i>
<i>Imagen 17_06: Equipos ATEX.....</i>	<i>172</i>
<i>Imagen 17_07: Zonas ATEX.....</i>	<i>172</i>
<i>Imagen 17_08: Zonas ATEX en una gasolinera común (GASES).....</i>	<i>173</i>
<i>Imagen 17_09: Zonas ATEX en un aserradero (POLVO).....</i>	<i>173</i>
<i>Imagen 17_10: Materiales para aparatación eléctrica en zonas ATEX.....</i>	<i>174</i>
<i>Imagen 17_11: b) isenthalpic expansion from 1000 to 13 bar.....</i>	<i>175</i>
<i>Imagen 17_12: Inversión térmica del hidrógeno y t^a de fuga del tanque.....</i>	<i>176</i>
<i>Imagen 17_13: Tubo de aluminio deteriorado por la difusividad del hidrógeno.....</i>	<i>177</i>
<i>Imagen 17_14: Fisuras por fragilización del hidrógeno en el acero.....</i>	<i>177</i>
<i>Imagen 17_15: Reglamentación sist. de almacenamiento y pilas de combustible.....</i>	<i>178</i>

Capítulo 1

1 Introducción

En este capítulo introductorio, se pretende desarrollar el conjunto de metas que se propone alcanzar. Con todo ello, se describen no solo las motivaciones y justificación del presente TFG sino que también se indican las posibles habilidades cognitivas desarrolladas.

Tiempo de lectura 25 min aprox

1.1 Motivaciones y justificación

El presente trabajo final de grado pretende en cierta medida dar valor científico, social, práctico, teórico y económico al reto que se plantea: descarbonización del sistema eléctrico de potencia de la isla de El Hierro mediante el uso de hidrógeno como vector energético.

La motivación principal es la de satisfacer esta necesidad real, la descarbonización del SEP de la isla y la mejora de la calidad del suministro energético. En esta época de transición energética, el combustible presente capaz de llevar a cabo dicha acción es el hidrógeno como vector energético.

Las razones por las cuales se ha seleccionado la temática del TFG han sido los problemas medioambientales, la fuerte dependencia de combustibles fósiles, la sustitución de las tecnologías clásicas de combustión por pilas de combustible a gran escala, hacer que las tecnologías del hidrógeno sean más accesibles y sobretodo proporcionar un suministro de calidad de energía eléctrica acorde a las necesidades de la isla.

Las expectativas que se tienen para la ampliación de conocimientos son la gestión de energías renovables, el dimensionado de forma teórica de sistemas de almacenamiento y producción de electricidad por medio de hidrógeno.

¿Para quien está destinada la lectura del presente TFG? En definitiva para cualquier público. No obstante, a pesar de que se explican todos los conceptos, es recomendable poseer ciertos conocimientos en el ámbito de la ingeniería eléctrica. Es por ello que los estudiantes de grado en ingeniería, profesionales o entusiastas del sector, puedan beneficiarse de su lectura.

La metodología aplicada en el siguiente TFG se ha repartido en varias fases. La primera ha sido la de obtener información sobre problemas de ingeniería técnica reales que necesitan ser solucionados. Los problemas que se han barajado pertenecen a los estudios cursados y a la situación temporal actual. La segunda fase ha consistido en valorar de los temas propuestos, cuáles de ellos existía más información y cuál estaba más al nivel de los estudios cursados. Con toda la información recopilada y la ayuda de los tutores, se ha discernido la problemática del TFG, por lo que ésta sería la tercera fase. Finalmente se determinó un orden lógico y contextual de los puntos a trabajar para ser redactados en la presente memoria.

Debido a que el tema escogido para el TFG sería desorbitado hacer un proyecto donde se materializa una idea en algo real, es más correcto realizar el estudio de qué es lo que haría falta para resolver un problema actual de ingeniería técnica en el ámbito del objeto a tratar. Con ello se ha conseguido adaptarse a los créditos y horas que marca la escuela para el trabajo final de grado.

Los datos con los que se ha trabajado son de índole públicos por lo que se desconoce si lo que realmente está materializado en la calle es real, no obstante se ha realizado el TFG con toda la rigurosidad que ha sido posible o han permitido los datos de las fuentes públicas.

El estudio se ha realizado para el año 2019 por lo que todos los datos que se han empleado son de ese año o se han hecho una serie de estimaciones aproximadas que determinarían su valor. En cualquier caso, siempre se indica que datos pertenecen a qué año.

1.2 Objetivos del trabajo final de grado

Los objetivos del presente TFG van de lo general a lo particular. A continuación se enumeran según al grupo que pertenezcan:

Objetivos generales

- 1) Satisfacer la necesidad actual de descarbonizar un sistema eléctrico de potencia.
- 2) Mejorar la calidad de suministro de energía eléctrica.
- 3) Hacer uso de las tecnologías maduras del hidrógeno para resolver el problema técnico que se plantea.

Objetivos particulares

- 1) Dar a conocer el panorama actual respecto a la transición energética.
- 2) Analizar y simular un sistema eléctrico de potencia.
- 3) Realizar varios estudios relacionados con la gestión de energía procedente de recursos renovables.
- 4) Dimensionado teórico de sistemas de almacenamiento en forma de hidrógeno.
- 5) Determinar acciones, medidas y orientaciones para que las tecnologías del hidrógeno sean competitivas.
- 6) Dar a conocer la normativa referente al suministro y calidad de la energía eléctrica.
- 7) Dar a conocer la normativa referente a la seguridad en instalaciones de hidrógeno.
- 8) Hacer consciencia de forma aproximada de posibles costes económicos.
- 9) Proporcionar una propuesta solución que otorgue un orden de magnitud para la resolución del problema técnico objeto de estudio.

1.3 Objetivos personales

Toda acción tiene reacción. Esta frase que hace referencia a la 3º Ley de Newton no solo se puede aplicar a la física. Si se extrapola su significado en el contexto de este apartado, se puede afirmar que cualquier desarrollo en el ámbito académico o profesional lleva implícito aprendizajes de carácter personal. ¿Qué reacción o mejor dicho, qué objetivos personales implica este TFG?

- 1) Aplicar conceptos eléctricos.
- 2) Asentar conocimientos en el entorno de simulación PowerWorld para sistemas eléctricos de potencia.
- 3) Aprender más sobre gestión de energías renovables.
- 4) Asentar conocimientos de química, termodinámica y mecánica de fluidos.
- 5) Tomar agilidad en el trabajo con herramientas informáticas.
- 6) Desarrollar habilidades comunicativas y expresivas en el ámbito en cuestión.
- 7) Aprender sobre los sectores del hidrógeno y de los sistemas eléctricos de potencia que están tan en auge a día de hoy.
- 8) Transmitir y difundir todos los conceptos tratados el TFG de forma clara y sencilla, para que todo pueda ser entendido tanto por personas conocedoras o no del sector.
- 9) Mejorar la competencia de aprendizaje permanente.

1.4 Asignaturas de la carrera aplicadas

Las asignaturas de la carrera que han hecho posible o que han tenido mayor repercusión y han permitido la redacción del TFG son las que se presentan a continuación. Todo lo aprendido a lo largo de la carrera ha influenciado en mayor o menor medida, no obstante, las asignaturas que se mencionan en este apartado son las más significantes, no sólo por su contenido sino especialmente por las competencias y competencias transversales. En la ejecución del TFG son las más se han trabajado.

¿Cómo está organizado este apartado? En primer lugar, existe una breve descripción de cada asignatura para hacer conciencia al lector/a de que trata, en segundo lugar, se muestra una tabla con la información esencial y, en tercer lugar, otra tabla (si existe) de las competencias indicadas. Resaltar que todos los códigos y asignaturas en tablas tienen su link correspondiente con la escuela por si se requiere indagar más a fondo.

La asignatura de Matemáticas I contempla el estudio de álgebra lineal, diagonalización, geometría, cálculo diferencial en una y varias variables, cálculo integral en una y varias variables.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12065	Matemáticas I	Formación Básica	1	T	9

Tabla 1.4_01: Matemáticas I

Materia	Competencia
Matemáticas I	Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.

Tabla 1.4_02: Competencias Matemáticas I

La asignatura de Física trata sobre Campos escalares y vectoriales, cinemática, dinámica de la partícula y de los sistemas de partículas, dinámica de rotación, movimiento armónico simple, movimiento ondulatorio, ondas mecánicas, propiedades comunes de las ondas e introducción a la óptica.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12068	Física	Formación Básica	1	T	9

Tabla 1.4_03: Física

Materia	Competencia
Física	Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
Física	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

Tabla 1.4_04: Competencias Física

Materia	Competencia transversal
Física	(09) Pensamiento crítico

Tabla 1.4_05: Competencias Transversales Física

La asignatura de Electricidad ocupa los temas del estudio de la electrostática y campos magnéticos tales como el campo eléctrico y potencial, capacidad, corriente eléctrica, ley de Ohm, el campo magnético, flujo e inducción magnética, Leyes de Maxwell, Acoplamientos y circuitos magnéticos.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12069	Electricidad	Formación Básica	1	A	6

Tabla 1.4_06: Electricidad

Materia	Competencia
Física	Comprensión y dominio de los conceptos básicos sobre las leyes generales de la mecánica, termodinámica, campos y ondas y electromagnetismo y su aplicación para la resolución de problemas propios de la ingeniería.
Física	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Física	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.

Tabla 1.4_07: Competencia Electricidad

Materia	Competencia transversal
Física	(09) Pensamiento crítico

Tabla 1.4_08: Competencias Transversales Electricidad

La asignatura de Expresión gráfica se ciñe a las técnicas de representación, concepción espacial, normalización, geometría, diseño asistido por ordenador y sistemas de representación.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12070	Expresión gráfica	Formación Básica	1	A	6

Tabla 1.4_09: Expresión Gráfica

Materia	Competencia
Expresión Gráfica	Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
Expresión Gráfica	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Expresión Gráfica	Capacidad de visión espacial y conocimiento de las técnicas de representación gráfica, tanto por métodos tradicionales de geometría métrica y geometría descriptiva, como mediante las aplicaciones de diseño asistido por ordenador.
Expresión Gráfica	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_10: Competencias Expresión Gráfica

Materia	Competencia transversal
Expresión Gráfica	(13) Pensamiento crítico

Tabla 1.4_11: Competencias Transversales Expresión Gráfica

La asignatura de Informática se centra en los conocimientos básicos sobre la estructura física y lógica del PC, sistemas operativos actuales, conocimientos teóricos y prácticos de la programación, conocimientos teóricos y prácticos de las bases de datos y manejo de programas directamente relacionados con el título.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12072	Informática	Formación Básica	1	B	6

Tabla 1.4_12: Informática

Materia	Competencia
Informática	Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.
Informática	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

Tabla 1.4_13: Competencias Informática

Materia	Competencia transversal
Informática	(06) Trabajo en equipo y liderazgo
Informática	(08) Comunicación efectiva

Tabla 1.4_14: Competencias Transversales Informática

La asignatura de química persigue dos grandes metas: por un lado, proporcionar las bases atómico-moleculares para interpretar las propiedades de interés (propiedades eléctricas y magnéticas) en los materiales de uso habitual en ingeniería eléctrica (conductores, semiconductores, aislantes y materiales dieléctricos); por otro dotar de las herramientas y conceptos indispensables para comprender los principios básicos de la electroquímica y su aplicación al estudio de dispositivos de conversión electroquímica de energía y de los fenómenos de corrosión metálica.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12073	Química	Formación Básica	1	A	6

Tabla 1.4_15: Química

Materia	Competencia
Química	Capacidad para comprender y aplicar los principios de conocimientos básicos de la química general, química orgánica e inorgánica y sus aplicaciones en la ingeniería.
Química	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Química	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Tabla 1.4_16: Competencias Química

Materia	Competencia transversal
Química	(07) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional
Química	(10) Conocimiento de problemas contemporáneos

Tabla 1.4_17: Competencias Transversales Química

La asignatura de Ciencias de materiales tiene como objetivo enseñar el conjunto de materiales que tiene a su disposición el Ingeniero Eléctrico para desarrollar su actividad profesional. La asignatura presenta un planteamiento dirigido a conocer la relación entre la estructura de los materiales y las prestaciones finales de los mismos.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12074	Ciencia de Materiales	Obligatorio	1	B	4,5

Tabla 1.4_18: Ciencia de Materiales

Materia	Competencia
Mecánica y Materiales	Conocimiento y utilización de los principios de la resistencia de materiales.
Mecánica y Materiales	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Mecánica y Materiales	Conocimientos de los fundamentos de ciencia, tecnología y química de materiales. Comprender la relación entre la microestructura, la síntesis o procesado y las propiedades de los materiales.

Tabla 1.4_19: Competencias Ciencia de Materiales

La asignatura de máquinas y mecanismos muestra los conceptos de cinemática y dinámica de máquinas. Profundizar en el estudio de distintos tipos de sistemas de transmisión, de mecanismos de levas y de las diferentes tipologías de mecanismos planos.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12076	Máquinas y Mecanismos (IT2)	Obligatorio	1	B	4,5

Tabla 1.4_20: Máquinas y Mecanismos

Materia	Competencia
Mecánica y Materiales	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Mecánica y Materiales	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
Mecánica y Materiales	Conocimiento de los principios de teoría de máquinas y mecanismos.

Tabla 1.4_21: Competencias Máquinas y Mecanismos

Materia	Competencia transversal
Mecánica y Materiales	(04) Innovación, creatividad y emprendimiento

Tabla 1.4_22: Competencias Transversales Máquinas y Mecanismos

La asignatura de Circuitos eléctricos aborda el análisis de circuitos en corriente continua y análisis de circuitos corriente alterna en régimen permanente para sistemas monofásicos.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12079	Circuitos Eléctricos	Obligatorio	1	B	4,5

Tabla 1.4_23: Circuitos Eléctricos

Materia	Competencia
Tecnología Eléctrica	Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
Tecnología Eléctrica	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

Tabla 1.4_24: Competencias Circuitos Eléctricos

Materia	Competencia transversal
Tecnología Eléctrica	(13) Instrumental específica

Tabla 1.4_25: Competencias Transversales Circuitos Eléctricos

La asignatura de Matemáticas II, como continuación de Matemáticas I, tiene como objetivos trabajar la capacidad para resolver problemas que puedan plantearse en el campo de la ingeniería industrial, aplicando los conocimientos que se adquieren en el cálculo de ecuaciones diferenciales ordinarias y en derivadas parciales, mediante su resolución analítica y por métodos numéricos; el uso de la transformada de Laplace y su inversa; así como de técnicas de optimización.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12066	Matemáticas II	Formación Básica	2	A	6

Tabla 1.4_26: Matemáticas II

Materia	Competencia
Matemáticas	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Matemáticas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
Matemáticas	Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.

Tabla 1.4_27: Competencias Matemáticas II

Materia	Competencia transversal
Matemáticas	(03) Análisis y resolución de problemas

Tabla 1.4_28: Competencias Transversales Matemáticas II

La asignatura de Estadística proporciona las herramientas estadísticas imprescindibles para realizar cualquier investigación, plantear, organizar, presentar la información recogida, técnicas de Inferencia Estadística y modelos de regresión.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12067	Estadística	Formación Básica	2	A	6

Tabla 1.4_29: Estadística

Materia	Competencia
Matemáticas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
Matemáticas	Capacidad para la resolución de los problemas matemáticos que puedan plantearse en la ingeniería. Aptitud para aplicar los conocimientos sobre: álgebra lineal; geometría; geometría diferencial; cálculo diferencial e integral; ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales; métodos numéricos; algorítmica numérica; estadística y optimización.

Tabla 1.4_30: Competencias Estadística

Materia	Competencia transversal
Matemáticas	(09) Pensamiento crítico

Tabla 1.4_31: Competencias Transversales Estadística

La asignatura de Resistencia de materiales analiza los elementos estructurales sometidos a esfuerzos de tracción, compresión, cortadura, torsión y flexión, solicitaciones combinadas y el análisis de sistemas isostáticos e hiperestáticos.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12075	Resistencia de Materiales (IT2)	Obligatorio	2	B	4,5

Tabla 1.4_32: Resistencia de Materiales

Materia	Competencia
Mecánica y Materiales	Conocimiento y utilización de los principios de la resistencia de materiales.
Mecánica y Materiales	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Mecánica y Materiales	Conocimientos de los fundamentos de ciencia, tecnología y química de materiales. Comprender la relación entre la microestructura, la síntesis o procesado y las propiedades de los materiales.

Tabla 1.4_33: Competencias Resistencia de Materiales

Materia	Competencia transversal
Mecánica y Materiales	(11) Aprendizaje permanente

Tabla 1.4_34: Competencias Transversales Resistencia de Materiales

La asignatura de Mecánica de Fluidos pretende hacer una introducción a los diferentes aspectos relacionados con la física de los fluidos y su flujo: propiedades de los fluidos, estática, cinemática y dinámica de los mismos, flujos externos, etc. Se estudia también algunas aplicaciones importantes de la mecánica de fluidos como pueden ser los sistemas hidráulicos a presión y el transporte en lámina libre. Por último, se estudia los aspectos básicos de las máquinas hidráulicas: tipologías, funcionamiento, selección, instalación, etc.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12077	Mecánica de Fluidos	Obligatorio	2	B	4,5

Tabla 1.4_35: Mecánica de Fluidos

Materia	Competencia
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Conocimientos de los principios básicos de la mecánica de fluidos y su aplicación a la resolución de problemas en el campo de la ingeniería. Cálculo de tuberías, canales y sistemas de fluidos.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Tabla 1.4_36: Competencias Mecánica de Fluidos

Materia	Competencia transversal
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(03) Análisis y resolución de problemas
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(04) Innovación, creatividad y emprendimiento
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(05) Diseño y proyecto

Tabla 1.4_37: Competencias Transversales Mecánica de Fluidos

La asignatura de Termodinámica y Transmisión de calor está separada en 2 partes. Como su nombre indica, la primera está directamente relacionada con máquinas térmicas donde se desarrollan los conceptos de calor, energía, trabajo y entropía. En la segunda parte se tratan los conceptos de radiación, conducción y convección térmica.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12078	Termodinámica y Transmisión de Calor	Obligatorio	2	B	4,5

Tabla 1.4_38: Termodinámica y Transmisión de Calor

Materia	Competencia
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Conocimientos de termodinámica aplicada y transmisión de calor. Principios básicos y su aplicación a la resolución de problemas de ingeniería.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Tabla 1.4_39: Competencias Termodinámica y Transmisión de Calor

Materia	Competencia transversal
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(03) Análisis y resolución de problemas
Termodinámica y Mecánica de Fluidos	(07) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional

Tabla 1.4_40: Competencias Transversales Termodinámica y Transmisión de Calor

La asignatura de Máquinas Eléctricas establece las bases de los circuitos magnéticos y de la conversión de energía en sistemas magnéticos dotados de movimiento, y se realiza un estudio riguroso de los transformadores monofásicos y trifásicos.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12080	Máquinas Eléctricas	Obligatorio	2	B	4,5

Tabla 1.4_41: Máquinas Eléctricas

Materia	Competencia
Tecnología Eléctrica	Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.

Tabla 1.4_42: Competencias Máquinas Eléctricas

Materia	Competencia transversal
Tecnología Eléctrica	(11) Aprendizaje permanente

Tabla 1.4_43: Competencias Transversales Máquinas Eléctricas

La asignatura de Sistemas de Producción Industrial se centra en proporcionar los conocimientos teóricos y prácticos sobre los distintos procesos industriales de fabricación, profundizando en los aspectos tecnológicos fundamentales de cada uno de ellos y en los requisitos necesarios para su uso e implementación.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12084	Sistemas de Producción Industrial	Obligatorio	2	B	4,5

Tabla 1.4_44: Sistemas de Producción Industrial

Materia	Competencia
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimientos básicos de los sistemas de producción y fabricación.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_45: Competencias Sistemas de Producción Industrial

Materia	Competencia transversal
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(06) Trabajo en equipo y liderazgo
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(12) Planificación y gestión del tiempo

Tabla 1.4_46: Competencias Transversales Sistemas de Producción Industrial

La asignatura de Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio proporciona las herramientas y métodos de análisis de los circuitos eléctricos para poder abordar cualquier planteamiento eléctrico en la vida real, dimensionado de instalaciones eléctricas trifásicas, manejo de los métodos clásicos, de las transformaciones de Laplace y de la frecuencia compleja y el manejo del programa informático Pspice para la simulación del comportamiento eléctrico de sistemas reales en régimen transitorio y permanente.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12087	Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio	Obligatorio	2	A	6

Tabla 1.4_47: Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio

Materia	Competencia
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.

Tabla 1.4_48: Competencias Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio

Materia	Competencia transversal
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(01) Comprensión e integración

Tabla 1.4_49: Competencias Transversales Sist. Eléct. Trifásicos y Régimen Transitorio

La asignatura de Tecnología Medioambiental aborda los conceptos de contaminación industrial, control de la contaminación y residuos, conceptos de tecnologías de tratamientos de vertidos industriales, contaminación atmosférica, acústica. De forma paralela también se trata la interpretación y selección de la legislación local, autonómica, nacional y europea relacionada con la asignatura y las competencias del grado en ingeniería eléctrica.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12085	Tecnología Medioambiental	Obligatorio	3	B	4,5

Tabla 1.4_50: Tecnología Medioambiental

Materia	Competencia
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimiento, comprensión y capacidad para aplicar la legislación necesaria en el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimientos básicos y aplicación de tecnologías medioambientales y sostenibilidad.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_51: Competencias Tecnología Medioambiental

Materia	Competencia transversal
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(06) Trabajo en equipo y liderazgo
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(08) Comunicación efectiva
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(12) Planificación y gestión del tiempo

Tabla 1.4_52: Competencias Transversales Tecnología Medioambiental

La asignatura de Ampliación de Máquinas Eléctricas en ella se establecen las bases de los principios generales de las máquinas eléctricas rotativas. También se realizará el estudio de las máquinas síncronas trifásicas.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12088	Ampliación de Máquinas Eléctricas	Obligatorio	3	A	6

Tabla 1.4_53: Ampliación de Máquinas Eléctricas

Materia	Competencia
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de máquinas eléctricas.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad, razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.

Tabla 1.4_54: Competencias Ampliación de Máquinas Eléctricas

Materia	Competencia transversal
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(10) Conocimiento de problemas contemporáneos
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(13) Instrumental específica

Tabla 1.4_55: Competencias Transversales Ampliación de Máquinas Eléctricas

La asignatura de Líneas Eléctricas y Transporte de Energía Eléctrica trata sobre el diseño e implantación de líneas eléctricas de todo tipo con suministro en baja y alta tensión, principalmente en referencia al cálculo de dichas líneas eléctricas tanto en su parte mecánica como en su parte eléctrica y el diseño de protecciones.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12089	Líneas Eléctricas y Transporte Energía Eléctrica	Obligatorio	3	A	6

Tabla 1.4_56: Líneas Eléctricas y Transporte de Energía Eléctrica

Materia	Competencia
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de alta tensión.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Conocimiento, comprensión y capacidad para aplicar la legislación necesaria en el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de líneas eléctricas y transporte de energía eléctrica.

Tabla 1.4_57: Competencias Líneas Eléctricas y Transporte de Energía Eléctrica

Materia	Competencia transversal
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(04) Innovación, creatividad y emprendimiento
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(09) Pensamiento crítico

Tabla 1.4_58: Competencias Transversales Líneas Eléct. y Transporte de Energía Eléct.

La asignatura de Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión persigue el estudio teórico y práctico de las instalaciones eléctricas en alta tensión, dando una visión actual de la gestión del sistema eléctrico.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12091	Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión	Obligatorio	3	B	4,5

Tabla 1.4_59: Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión

Materia	Competencia
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de alta tensión.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_60: Competencias Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión

Materia	Competencia transversal
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(01) Comprensión e integración
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(02) Aplicación y pensamiento práctico

Tabla 1.4_61: Competencias Transversales Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión

La signatura de Sistemas Eléctricos de Potencia se ciñe en el modelado de transformadores, generadores y líneas eléctricas para proceder a su análisis por el método por unidad. También permite el cálculo de los flujos de potencia en los sistemas eléctricos de potencia y abordar la problemática de su estabilidad.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12095	Sistemas Eléctricos de Potencia	Obligatorio	3	B	4,5

Tabla 1.4_62: Sistemas Eléctricos de Potencia

Materia	Competencia
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimiento sobre sistemas eléctricos de potencia y sus aplicaciones.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Capacidad para el diseño de centrales eléctricas.

Tabla 1.4_63: Competencias Sistemas Eléctricos de Potencia

La asignatura de Oficina Técnica recoge las metodologías, técnicas e instrumentos con los que un profesional es capaz de idear, concebir soluciones y encontrar la respuesta a un problema complejo. Así mismo, las metodologías, técnicas e instrumentos apropiados para la gestión y los problemas de coordinación de actividades, recursos humanos y medios materiales. Se darán a conocer los principales tipos de proyectos, normativa a cumplir y requisitos para su ejecución.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12083	Oficina Técnica	Obligatorio	4	A	6

Tabla 1.4_64: Oficina Técnica

Materia	Competencia
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimientos básicos de los sistemas de producción y fabricación.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad para la dirección, de las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en la competencia 61.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimiento en materias básicas y tecnológicas, que les capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y teorías, y les dote de versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimiento, comprensión y capacidad para aplicar la legislación necesaria en el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimientos y capacidades para organizar y gestionar proyectos. Conocer la estructura organizativa y las funciones de una oficina de proyectos.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería industrial que tengan por objeto: la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	Capacidad para aplicar el conocimiento sobre la seguridad y salud laboral, prevención de riesgos laborales y seguridad en máquinas, según la normativa vigente en protección activa y pasiva sobre incendios y aspectos de contaminación acústica.

Tabla 1.4_65: Competencias Oficina Técnica

Materia	Competencia transversal
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(05) Diseño y proyecto
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(06) Trabajo en equipo y liderazgo
Producción Industrial y Gestión de Proyectos	(12) Planificación y gestión del tiempo

Tabla 1.4_66: Competencias Transversales Oficina Técnica

La asignatura de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión contempla el diseño e implantación de instalaciones eléctricas de todo tipo con suministro en baja tensión, principalmente en referencia al cálculo de líneas eléctricas, diseño de protecciones y topologías de instalación.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12090	Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión	Obligatorio	4	A	7,5

Tabla 1.4_67: Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión

Materia	Competencia
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Conocimiento y utilización de los principios de teoría de circuitos y máquinas eléctricas.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_68: Competencias Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión

Materia	Competencia transversal
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(01) Comprensión e integración
Diseño y Cálculo de Instalaciones y Máquinas Eléctricas	(02) Aplicación y pensamiento práctico

Tabla 1.4_69: Competencias Transversales Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión

La asignatura de Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos estudia las máquinas de continua y las asíncronas y se establecen las estrategias y métodos más utilizados en el control de las máquinas de continua y de las máquinas asíncronas.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12093	Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos	Obligatorio	4	A	6

Tabla 1.4_70: Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos

Materia	Competencia
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimientos sobre control de máquinas y accionamientos eléctricos y sus aplicaciones.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimiento sobre sistemas eléctricos de potencia y sus aplicaciones.

Tabla 1.4_71: Competencias Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos

Materia	Competencia transversal
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(03) Análisis y resolución de problemas
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(11) Aprendizaje permanente
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(13) Instrumental específica

Tabla 1.4_72: Competencias Transversales Control de Máquinas

La asignatura de Energías renovables ocupa los fundamentos de los diferentes métodos de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables. También se presenta la problemática del almacenamiento y control de la energía generada, que se agrava con el aumento de la producción ya que depende de factores no controlables, como el viento o la insolación solar.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12094	Energías Renovables	Obligatorio	4	A	4,5

Tabla 1.4_73: Energías renovables

Materia	Competencia
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Conocimiento aplicado sobre energías renovables.
Producción y Operación de Energía Eléctrica	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Tabla 1.4_74: Competencias Energías renovables

Materia	Competencia transversal
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(07) Responsabilidad ética, medioambiental y profesional
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(09) Pensamiento crítico
Producción y Operación de Energía Eléctrica	(10) Conocimiento de problemas contemporáneos

Tabla 1.4_75: Competencias Transversales Energías renovables

La asignatura de Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas analiza los riesgos de una utilización indebida de la energía eléctrica y de la necesidad de adoptar sistemas de protección atendiendo a la naturaleza de las actividades a desarrollar, prevención de riesgos, primeros auxilios en accidentes de naturaleza eléctrica y los instrumentación de medida, tanto aparatos analógicos como digitales.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12098	Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas	Optativo	4	B	4,5

Tabla 1.4_76: Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas

Materia	Competencia
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_77: Competencias Seguridad y Verificación de Instalaciones Eléctricas

La asignatura de Electrificación Urbanística permite saber proyectar instalaciones de esta índole dando como solución la más idónea desde el punto de vista técnico y económico, conocer las características de las instalaciones de la compañía suministradora y manejar los trámites de legalización que conlleva este tipo de instalaciones.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12099	Electrificación Urbanística	Optativo	4	B	4,5

Tabla 1.4_78: Electrificación Urbanística

Materia	Competencia
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de alta tensión.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para la dirección, de las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en la competencia 61.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Conocimiento, comprensión y capacidad para aplicar la legislación necesaria en el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería industrial que tengan por objeto: la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes, planes de labores y otros trabajos análogos.

Tabla 1.4_79: Competencias Electrificación Urbanística

La asignatura de Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables aborda el diseño e implantación de instalaciones eléctricas de energías renovables en el campo de la energía solar y eólica.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12100	Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables	Optativo	4	B	4,5

Tabla 1.4_80: Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables

Materia	Competencia
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Conocimiento aplicado sobre energías renovables.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para la redacción, firma y desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería industrial que tengan por objeto: la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de: estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_81: Competencias Instalaciones Eléctricas de Energías Renovables

La asignatura de Domótica permite adquirir el concepto y conocer el estado actual de la domótica, conocer las características y servicios integrados en los sistemas domóticos, conocer la arquitectura, características y equipos de los sistemas domóticos y aprender a diseñar e implementar instalaciones domóticas.

Código	Asignatura	Tipo	Curso	Sem	ECTS
12101	Domótica	Optativo	4	B	4,5

Tabla 1.4_82: Domótica

Materia	Competencia
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para el cálculo y diseño de instalaciones eléctricas de baja y media tensión.
Mención 1 (IT2): Gestión y Ejecución de Instalaciones Eléctricas Industriales y Urbanísticas	Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Tabla 1.4_83: Competencias Domótica

1.5 Competencias transversales del trabajo final de grado

“Una competencia transversal es aquella habilidad relacionadas con el desarrollo personal, que no dependen de un ámbito temático o disciplinario específico sino que aparece en todos los dominios de la actuación profesional y académica” (González y Wagenaar, 2003). Es por ello que las competencias transversales trabajadas en este TFG son aquellas que están directamente relacionadas con las asignaturas cursadas y aplicadas. Estas asignaturas son las mencionadas en el anterior apartado.

En la *Tabla 1.5_01* aparecen dichas competencias transversales y su respectivo código. Como bien se ha indicado en el apartado anterior en cuanto a las asignaturas aplicadas la TFG, se ha diseñado la *Tabla 1.5_02* donde indica la competencia transversal y su asignatura correspondiente. Independientemente del apartado anterior, se ha vuelto a subrayar de color fucsia claro las asignaturas con más peso y por consiguiente, su competencia transversal.

Todo esto se ha llevado a cabo para indicar y demostrar el respaldo en el que se ha basado la realización del TFG, las posibles habilidades adquiridas y las competencias de máximo nivel con las que se basa la rúbrica de evaluación. Cabe indicar, que paralelamente a lo cursado en la carrera se realizaron 2 cursos. El primer curso llamado “Simulación de Sistemas Eléctricos con Software” impartido por Inel Engineering Education de 30 horas y un segundo curso llamado “Conocimientos Avanzados en Hidrógeno y Pilas de Combustible” impartido por Ariema y avalado por la Asociación Española del Hidrógeno, con una duración de 150 horas. Todos ellos con modalidad online, han proporcionado conocimientos extra para la redacción del TFG.

Competencias transversales	
Código	Descripción
(01)	Comprensión e integración
(02)	Aplicación y pensamiento práctico
(03)	Análisis y resolución de problemas
(04)	Innovación, creatividad y emprendimiento
(05)	Diseño y proyecto
(06)	Trabajo en equipo y liderazgo
(07)	Responsabilidad ética, medioambiental y profesional
(08)	Comunicación efectiva
(09)	Pensamiento crítico
(10)	Conocimiento de problemas contemporáneos
(11)	Aprendizaje permanente
(12)	Planificación y gestión del tiempo
(13)	Instrumental específica

Tabla 1.5_01: Competencias transversales

Competencias transversales	
Código	Asignaturas
(01)	Sistemas Eléctricos Trifásicos y Régimen Transitorio, Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión, Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión.
(02)	Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión, Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión
(03)	Matemáticas II, Mecánica de Fluidos, Termodinámica y Transmisión de Calor, Control de Máquinas y Accionamientos Eléctrico.

Competencias transversales	
Código	Asignaturas
(04)	Máquinas y Mecanismos (IT2), Mecánica de Fluidos, Líneas Eléctricas y Transporte Energía Eléctrica.
(05)	Mecánica de Fluidos, Oficina Técnica.
(06)	Informática, Sistemas de Producción Industrial, Tecnología Medioambiental, Oficina Técnica.
(07)	Química, Termodinámica y Transmisión de Calor, Energías Renovables.
(08)	Informática, Tecnología Medioambiental.
(09)	Física, Electricidad, Estadística, Líneas Eléctricas y Transporte Energía Eléctrica, Energías Renovables.
(10)	Química, Ampliación de Máquinas Eléctricas, Energías Renovables.
(11)	Resistencia de Materiales (IT2), Máquinas Eléctricas, Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos.
(12)	Sistemas de Producción Industrial, Tecnología Medioambiental, Oficina Técnica.
(13)	Expresión gráfica, Circuitos Eléctricos, Control de Máquinas y Accionamientos Eléctricos.

Tabla 1.5_02: Competencias transversales con asignaturas

Capítulo 2

2 Transición energética

En este capítulo se trata sobre el cambio climático, la transición energética y los panoramas existentes en cuanto a la tecnología capaz de descarbonizar sectores completos. ¿Cuál es el papel del hidrógeno en todo esto? A continuación se desarrollan estos asuntos.

Tiempo de lectura 35 min aprox

2.1 Transición energética y cambio climático

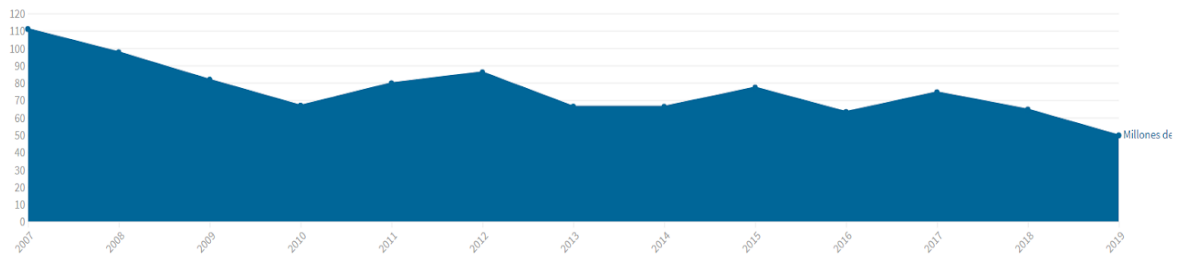
La transición energética se define como un cambio de paradigma a medio o largo plazo en los sistemas energéticos. Esto no es algo nuevo, desde que la humanidad ha sido capaz de hacer uso de la energía para su beneficio, han habido muchas transiciones energéticas. Hasta la fecha, siempre se ha quemado “algo”. ¿Como puede ser que a día de hoy, en los años 20 del siglo XXI, se siga quemando combustible?. Se sabe que cualquier proceso termodinámico que conlleve una combustión, sea del tipo que sea, nunca va a superar la eficiencia del ciclo de Carnot. Esto quiere decir, que quemando “algo” para extraer un trabajo, éste, será pequeño y no se aprovechará todo. Más desventajas que conllevan a quemar, son los subproductos que se generan en forma de contaminantes tanto sólidos como en forma de gas. Todo ello afecta negativamente a la biosfera y al aumento del efecto invernadero, como es bien sabido.

Gracias a que poco a poco se tiene mayor conciencia en cuanto a estos temas, según los datos de Red Eléctrica Española, cada año que pasa, van disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto es debido principalmente a la bajada de los costes en las tecnologías que aprovechan los recursos renovables, ya sea fotovoltaica o eólica. No hay que olvidar que al poseer un marco regulatorio favorecedor, donde no hay impedimentos como el impuesto al sol, ha impulsado de forma exponencial, la creación de más centrales eléctricas de carácter renovable.

Como se presenta en la *Imagen 2.1_01*, en el año 2019, se consiguió un mínimo histórico de emisiones de GEI teniendo un valor de 49,6 millones de toneladas de dióxido de carbono. Este valor, a pesar de parecer muy elevado, es el más bajo hasta la fecha y pertenece a las emisiones en generación eléctrica para España.

Evolución anual de las emisiones asociadas a la generación eléctrica

Millones de toneladas de CO₂ (tCO₂) | Sistema eléctrico español 2007-2019



Fuente: [REData](#)

Imagen 2.1_01: Millones de toneladas de CO₂ Sistema Eléctrico Español 2007-2019

Con todo ello, aún queda por delante mucho trabajo para alcanzar una neutralidad de emisiones o directamente no producir ninguna. La *Imagen 2.1_02* muestra las toneladas de CO₂ emitidas por cada MWh de energía producida según tecnologías de generación.

¿Cuáles son las tecnologías que más emiten en España?

Toneladas de CO₂ emitidas por cada MWh generado | 2019

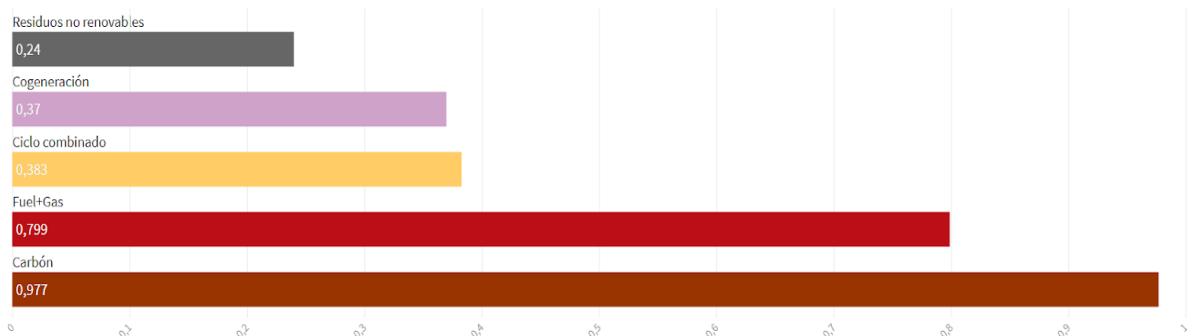


Imagen 2.1_02: Toneladas de CO₂ emitidas por cada MWh generado 2019

Estos valores, dan un orden de magnitud para detectar qué tecnologías deberían de perdurar en un espacio a medio plazo en el tiempo y cuales deberían de dejar de usarse ya. Aunque el TFG se ha desarrollado para el año 2019 por los motivos que se expresan en el apartado 3, su redacción se ha realizado en el año 2021. Esto quiere decir que en esta última fecha, ya se han cerrado 7 centrales térmicas de carbón. Su motivo ha sido todo lo comentado hasta ahora y principalmente porque esta tecnología ha llegado a un punto en que el precio del carbón, y las tasas por contaminación han aumentado tanto, que esta clase de centrales ya no son rentables.

Un informe de calidad del aire de la ONG conservacionista Ecologistas en Acción, tomando como referencia los valores máximos de contaminación recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), afirmó que para el año 2019, alrededor de 30.000 personas murieron en España por contaminación atmosférica. Está claro que un país tiene que tener suficiente libertad energética para satisfacer sus necesidades de consumo, pero, ¿A qué precio?, ¿Impuestos por contaminación, reducción de la biodiversidad e incluso de forma indirecta en la salud de las personas?. Es desorbitado, que con el desarrollo tecnológico actual y la cantidad de conocimientos técnicos que hay para solventar estas situaciones, aún se sufran estas consecuencias.

Es por ello que en España, existe un Marco Estratégico de Energía y Clima que contiene diversos elementos estratégicos y legislativos que tienen como objeto, marcar las principales líneas de acción en el camino hacia la neutralidad climática. Este marco está compuesto por los siguientes documentos:

- 1) Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030.
- 2) Borrador de la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo 2050
- 3) Proyecto de Ley de Cambio Climático y Transición Energética.
- 4) Estrategia de Transición Justa.
- 5) Estrategia Nacional de lucha contra la Pobreza Energética.

Como resumen global de todos los documentos mencionado anteriormente, se pretenden tomar las siguientes medidas:

- Alcanzar un 42% de penetración renovable en el uso final de la energía en el horizonte 2030, llegando al 74% renovable en el sector eléctrico.
- Hacer uso de las tecnologías de almacenamiento, por un valor de 6 GW nuevos instalados en dicho horizonte como por ejemplo el almacenamiento químico en forma de hidrógeno.
- Inclusión del almacenamiento en los territorios no peninsulares como tractores en la *“Medida 1.12. Proyectos singulares y estrategia para la energía sostenible en las islas”*
- Hacer uso de los portadores energéticos fundamentales para la descarbonización como el hidrógeno verde, una herramienta clave para la integración de los diferentes sectores energéticos, favoreciendo la seguridad, disponibilidad y flexibilidad energética, así como una mayor eficiencia y rentabilidad en la transición energética, contribuyendo a la descarbonización de la economía.

Además de los documentos citados, también se están elaborando otros documentos: Estrategia de Autoconsumo, la Hoja de Ruta del biogás, y la Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica Marina y las Energías del Mar en España, que ayudarán en la transición energética.

2.2 Panorama Nacional

Como se ha argumentado en el apartado anterior, en la transición energética va a ser indispensable el uso de las tecnologías del hidrógeno, pero... ¿Cuál es el estado del arte en España?, ¿Como se va a implantar esta tecnología si aún está en fases de desarrollo?, ¿No es un poco peligroso el uso del hidrógeno? Es normal plantearse esta serie de preguntas en este nivel de lectura del TFG. En este apartado solo se va a dar respuesta a la primera pregunta. No obstante, para ir introduciendo al lector/a poco a poco en el sector y adelantándose a otros puntos del TFG, se puede afirmar que las tecnologías que se van a emplear serán las más maduras del mercado. Tan maduras como las de los aerogeneradores con un tiempo de presencia en el mercado y mejoras continuas de alrededor de 60 años. Es cierto que el sector del hidrógeno puede parecer nuevo, pero lleva más tiempo de lo que se conoce popularmente. Respecto a la seguridad, simplemente indicar que una instalación de hidrógeno en condiciones adecuadas, es igual de segura como una de gas natural, propano, butano, diesel, gasolinas, etc. Como se desarrollará en el apartado de seguridad, no es más peligroso, solo es otra tecnología.

Antes de nombrar los proyectos existentes a nivel nacional, se tiene que explicar lo que se conoce como los niveles tecnológicos en proyectos piloto. Los TRL/MRL de sus siglas en inglés Technology Readiness Level y Manufacturing Readiness Levels respectivamente, son unos indicadores o fases que se utilizan para evaluar la madurez de una tecnología, sistema, subsistema o componente determinados desde una perspectiva de fabricación. Como se muestra en la *Imagen 2.2_01* proporcionada por Ariema S.L, resume el concepto expresado.

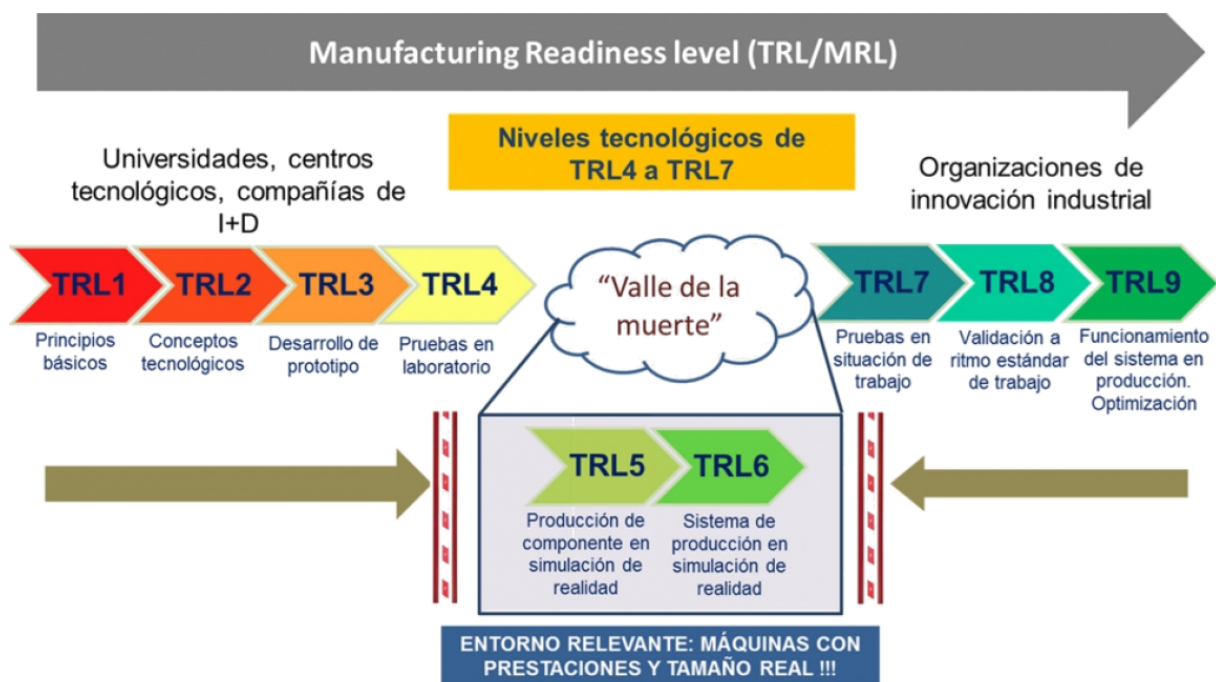


Imagen 2.2_01: TRL/MRL Niveles tecnológicos.

Los 3 proyectos más relevantes a nivel nacional que se indican a continuación, se han extraído del informe de proyectos de I+D+I de España realizado por la plataforma tecnológica Española del hidrógeno y de las pilas de combustible del año 2021. Existen 95 proyectos registrados en los que España tiene algún tipo de aportación o liderazgo, pero los más relacionados con el objeto de estudio del TFG son:

- 1) Grasshopper-grid assisting modular hydrogen pem power plant.
- 2) Desarrollo de un ecosistema de hidrógeno en la isla mallorca (green hysland).
- 3) Building Innovative Green Hydrogen Systems in Isolated Territories (BIG HIT).


Estos proyectos se encuentran entre los niveles TRL 6 y TRL 9, por lo que tienen un nivel de desarrollo elevado en cuanto a una aplicación real a escala industrial. Para saber en qué consisten estos proyectos a continuación se presentan una tablas resumen de cada uno de ellos:

NOMBRE DEL PROYECTO	
Grasshopper-grid assisting modular hydrogen pem power plant	
WEB	ENTIDAD COORDINADORA
https://www.grasshopperproject.eu/	INEA
LOGO	
	
PRESUPUESTO	PERÍODO DE EJECUCIÓN
4.387.063,75 €	2018-2021
RESUMEN CITADO	
<p><i>“El objetivo principal de Grasshopper es el desarrollo de una nueva generación de plantas de potencia basadas en pilas de combustible tipo PEM en escala de MW, que se caracterice por una alta flexibilidad en la producción de potencia y un CAPEX inferior a 1.500 €/kWe para un volumen anual de 25 MWe. Para ello, el proyecto contempla el diseño, construcción y puesta en marcha de una planta piloto modular de 100 kW, que incorporará un nuevo desarrollo de stacks, así como optimizaciones del balance de planta para alcanzar los objetivos de funcionamiento y coste. Esta planta piloto se validará en un entorno real, prestando servicios de red a partir de hidrógeno subproducto de una planta de cloro álcali localizada en Holanda. El desarrollo de esta planta servirá de demostración para una escala superior (MW).”</i></p>	

Tabla 2.2_01: Grasshopper-grid assisting modular hydrogen pem power plant.

NOMBRE DEL PROYECTO	
Desarrollo de un ecosistema de hidrógeno en la isla mallorca (green hysland).	
WEB	ENTIDAD COORDINADORA
En desarrollo	Enagas
PRESUPUESTO	PERÍODO DE EJECUCIÓN
20.709.070,00 €	2021-2026
RESUMEN CITADO	
<p><i>“Primer proyecto estratégico (flagship) del sur de Europa, creará un 'ecosistema de hidrógeno verde' en las islas Baleares. Por tanto, buscará generar, distribuir y utilizar en Mallorca al menos 300 toneladas de hidrógeno renovable al año, producido a partir de energía solar. El objetivo es reducir las emisiones de CO₂ la isla en hasta 20.700 toneladas al año. El CNH2 lidera los paquetes de trabajo 5 de análisis del ACV ambiental y el paquete de trabajo 7 de desarrollo de actividades de formación técnica.”</i></p>	

Tabla 2.2_02: Desarrollo de un ecosistema de h2 en la isla mallorca (green hysland).

NOMBRE DEL PROYECTO	
Building Innovative Green Hydrogen Systems in Isolated Territories (BIG HIT).	
WEB	ENTIDAD COORDINADORA
https://www.bighit.eu/	Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón
LOGO	
	
PRESUPUESTO	PERÍODO DE EJECUCIÓN
7.748.848,00 € (5 M€ Grant)	Mayo 2016 – abril 2022
RESUMEN CITADO	
<p><i>“BIG HIT es un proyecto pionero en el concepto de Valles de Hidrógeno, que implementa la producción de hidrógeno en las islas de Eday y Shapinsay (Orkney, UK) utilizando energía eólica y mareomotriz.”</i></p>	

RESUMEN CITADO

La electricidad renovable generada en estas islas y que no puede llegar a consumirse en ese momento por ser la demanda de electricidad inferior a la producción, es utilizada para producir hidrógeno mediante electrólisis de agua, por medio de 2 electrolizadores PEM de 1 MW cada uno. Este hidrógeno se almacena como gas de alta presión en los camiones especialmente diseñados por la compañía aragonesa Calvera, para posteriormente ser utilizado en calderas catalíticas de H₂ en las islas y para ser transportado a la isla principal de Orkney, Kirkwall. En Kirkwall, una pila de combustible de hidrógeno de 75 kW suministra calor y energía eléctrica a varios edificios portuarios, y cold ironing a los ferries. Y finalmente, una estación de repostaje de hidrógeno en Kirkwall alimentará vehículos de pila de combustible de Symbio. La demostración realizada por el proyecto BIGHIT en las islas Orcadas de Escocia servirá para mostrar un territorio que, apuesta por el hidrógeno, y su posible replicabilidad a otros territorios.”

Tabla 2.2_03: Grasshopper-grid assisting modular hydrogen pem power plant.

En el proyecto de la *Tabla 2.2_01* se habla del CAPEX. Este término (capital expenditure), es la inversión en capital o inmovilizado fijo que realiza una compañía ya sea para adquirir, mantener o mejorar su activo no corriente. Es decir, en este caso significa que se pretende conseguir un coste de producción por kWe inferior a 1.500 €. Con esta aclaración, se puede aprovechar para definir otro término importante en esta clase de proyectos. El OPEX (Operational expenditures) es un costo permanente para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema.

Tanto como el Capex y el Opex son costes que al tratar proyectos de hidrógeno actualmente están altos y provocan que los proyectos sean muy costosos o no rentables. Por ello, se está trabajando mucho para que bajen y puedan permitir la materialización de más proyectos. Estos términos se volverán a tratar en el apartado de, ¿Qué le hace falta a las tecnologías del hidrógeno y pilas de combustible para ser mínimamente competitivas?.

Como entidades más importantes del sector se pueden encontrar, la Asociación Española del Hidrógeno (AeH₂), a Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible (PTE HPC), Centro Nacional de Hidrógeno (CNH₂), Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del hidrógeno en Aragón, H2B2, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), Ariema S.L y Clantech S.L.

Todos ellos tienen una gran cantidad de proyectos de investigación a pequeña escala, que también están relacionados de alguna forma con el sector, pero no son tan relevantes para el objeto de estudio del TFG como los indicados en las tablas anteriores.

Paralelamente empresas como Endesa, Iberdrola, Repsol, Talgo, etc, tienen decenas de proyectos para la integración del hidrógeno verde dentro de sus actividades. Todas ellas favorecen a la economía del hidrógeno, desde generación de H₂, pasando por aplicaciones para el transporte, hasta para el consumo de H₂, para la producción de energía eléctrica.

2.3 Panorama Europeo

Un punto de no retorno. Entre los días 30 de noviembre y 12 de diciembre, tuvo lugar en París la vigésimo primera sesión de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21). En ella 195 países firmaron un acuerdo para mantener el calentamiento global por debajo de 2 °C y busca, además, promover esfuerzos adicionales que hagan posible que el calentamiento global no supere los 1,5 °C. Este objetivo ambicioso requiere que las economías de todo el mundo descarbonicen grandes partes del sistema energético mundial.

Es por ello que los esfuerzos para la descarbonización de los sistemas energéticos, se deben centrar en 4 pilares esenciales que son: la eficiencia energética, las fuentes de energía renovables, los vectores energéticos y el almacenamiento de la energía. Así pues, el hidrógeno puede proporcionar 7 funciones en la descarbonización en los principales sectores de la economía europea y mundial. Como muy bien resume la *Imagen 2.3_01* extraída de la hoja de ruta del Hydrogen Council denominada How hydrogen empowers the energy transition (Jan 2017), se observa que el H₂ permite la integración y regulación de las energías renovables, su distribución, almacenamiento y descarbonización de diferentes sectores tales como el transporte y la industria.

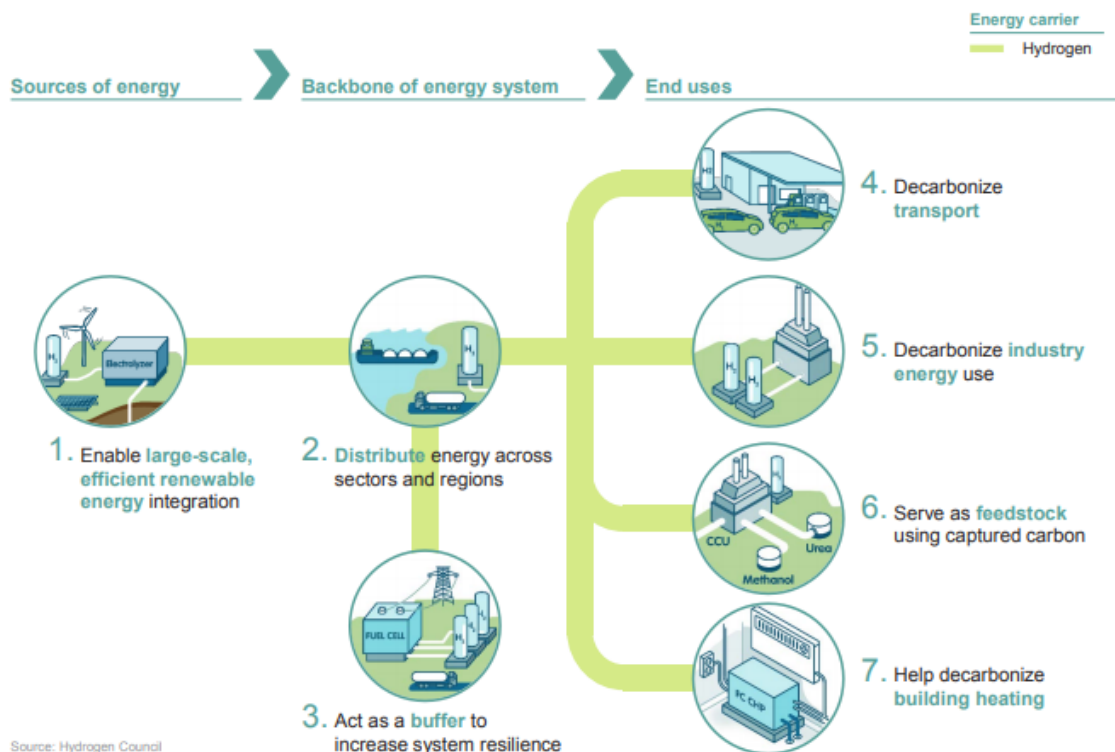


Imagen 2.3_01: Funciones del H₂ para la descarbonización.

Un ejemplo claro para la integración de las energías renovables por medio del uso del H₂ como vector energético es cuando se aplica el conocido “res curtailment”, cuando se genera más energía que la que se consume. Este concepto lo único que quiere transmitir es que cuando existe un exceso de generación de energía proveniente de recursos renovables, y el consumo es menor, se desconectan los grupos generadores. ¿Qué sentido tiene hacer esto?. Ninguno. A efectos prácticos se hace para no dañar la infraestructura existente, pero, ¿Por qué no se almacena para cuando no hayan recursos renovables?. Básicamente por que el almacenar la energía eléctrica es quizás el principal problema de ingeniería que aún no se ha sido capaz de resolver de forma eficiente, económica, viable, etc.

Existen muchas formas de almacenar la energía, el problema es que sigue siendo muy difícil almacenar y aún más, cuando se trata de Gigavatios de potencia instalada. Todo ello sin hablar de las transformaciones internas de la energía según su forma de almacenamiento y eficiencia a lo largo de su proceso. En la hoja de ruta del Hydrogen Council mencionado anteriormente, se presenta una gráfica (*Imagen 2.3_02*) para hacerse un orden de magnitud de la capacidad de las tecnologías presentes.

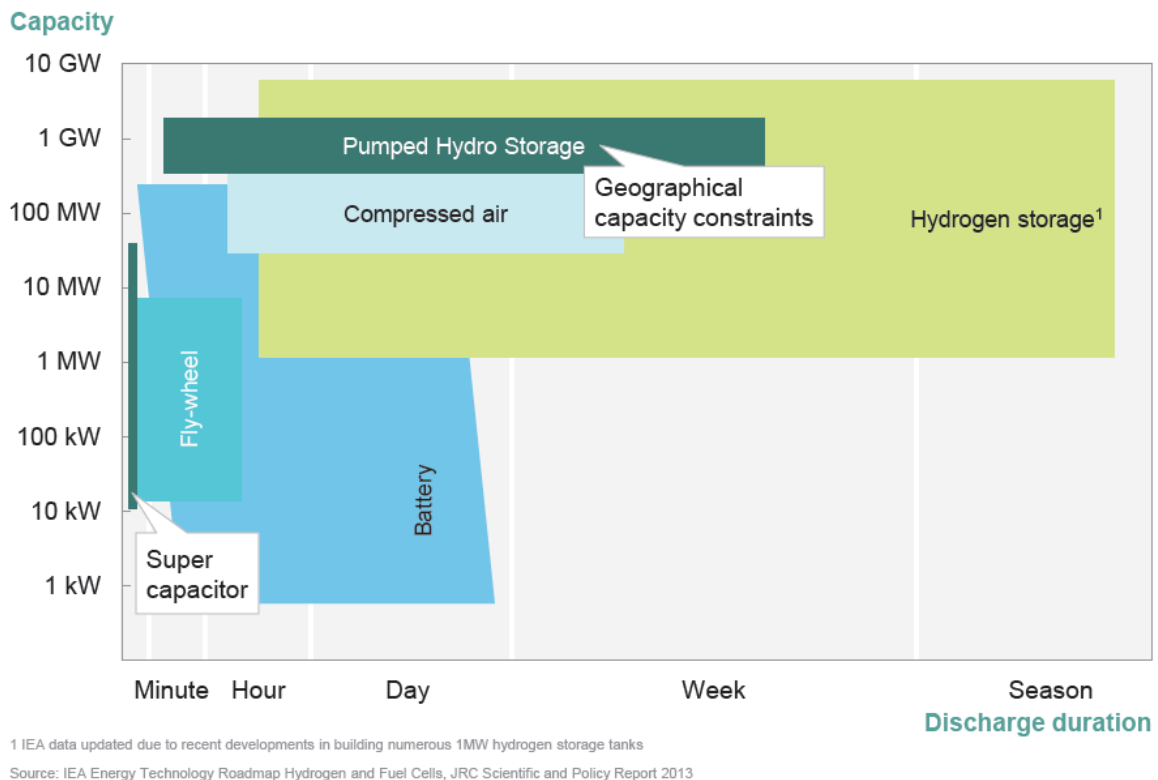


Imagen 2.3_02: Tecnologías de almacenamiento de energía.

Volviendo al ejemplo de aplicación, donde el hidrógeno puede tener un gran protagonismo en la regulación de las fuentes inconstantes de recursos renovables, el estudio METIS S11 de la European Commission del 2018 determina un escenario objetivo para España en 2030, donde aparece un exceso de producción de energía. Como se muestra en la *Imagen 2.3_03*, España tendrá un exceso de producción de energía que debe ser almacenado.

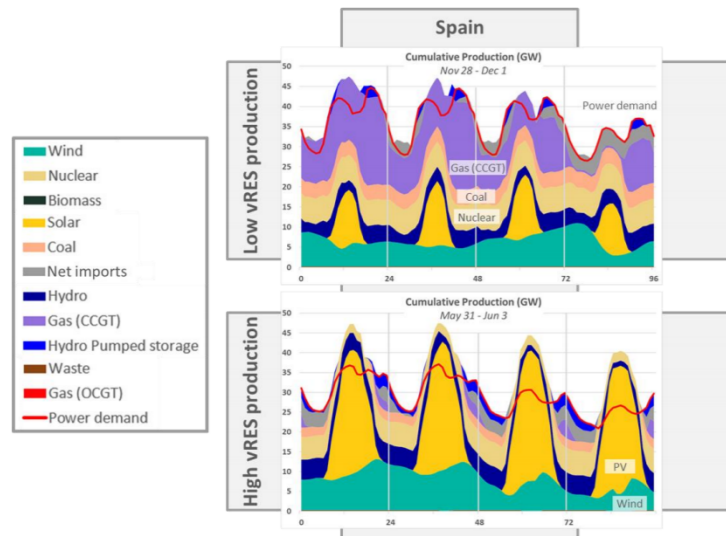


Imagen 2.3_03: Escenario objetivo España 2030.

Los periodos de mayor producción de exceso de energía, se puede almacenar haciendo uso de la electrólisis proveniente de parques fotovoltaicos y eólicos, almacenar el hidrógeno y posteriormente se puede quemar en centrales puntas de turbinas de gas o directamente haciendo uso de centrales de pilas de combustible. También se puede inyectar en la red local de gasoductos o para el uso del sector del transporte. Estas cifras están mirando de cara a un futuro cercano, pero si se busca en un país de la unión europea donde tenga una gran potencia instalada de energía eólica como por ejemplo Alemania, ni siquiera hace falta calcular futuros escenarios.

En 2017, Alemania aplicó un “res curtailment” de 2 TWh debido a condiciones excepcionales climatológicas del norte del país. Esta clase de situaciones son una realidad, y cuanto antes se haga uso de las tecnologías del hidrógeno, antes se podrá alcanzar los objetivos marcados en la COP 21. Como muestra la *Imagen 2.3_04*, proporcionada por el estudio de la Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) denominado “Study on early business cases for H₂ in energy storage & more broadly power to H₂ applications” y realizado en Junio 2017, se observa la energía generada del país.

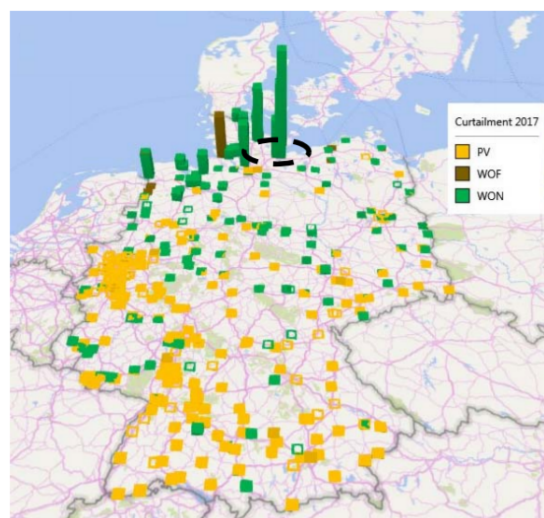


Imagen 2.3_04: Res curtailment Alemania 2017.

Otro aspecto importante a tratar son las plantas de producción de hidrógeno en Europa, si no se produce hidrógeno, el objeto de estudio no tiene sentido. En este caso como se indica en el informe de los autores Madsen, Anne Nygaard, Andersen y Per Dannemand llamado "Innovative regions and industrial clusters in hydrogen and fuel cell technology" publicado en el 2010 con datos del 2007, analiza qué regiones están más comprometidas en el sector.

El informe se fundamenta en 3 indicadores que son la infraestructura de hidrógeno existente, los lugares de producción de H_2 y la presencia de clusters industriales de los cuales se puedan aprovechar de esta tecnología. Como se puede observar en la *Imagen 2.3_05*, existen una gran cantidad de focos tanto en España como en el resto de Europa.

Comparando los datos del res curtailment del norte de Alemania, con la producción de H_2 en el mismo país, tiene sentido que en el norte exista una gran cantidad de sitios de producción.

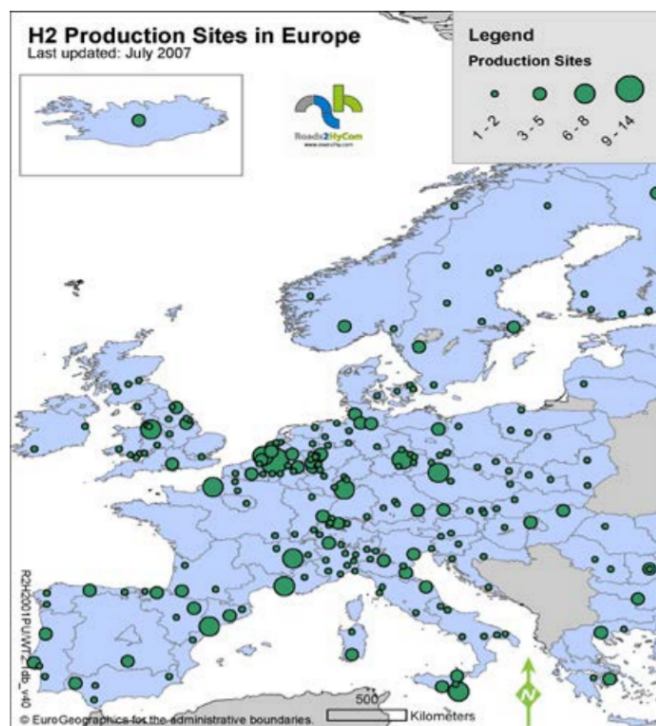


Imagen 2.3_05: Plantas de producción de H_2 en Europa.

El artículo concluye que, si bien se necesita investigación antes de que se puedan extraer implicaciones reales, en el funcionamiento del sistema regional de innovación, es importante una fase formativa donde luego permita una innovación y desarrollo industrial por partes de las empresas.

Pese a que los datos presentados quizás sean un tanto antiguos debido a la escasez de información en cuanto a esta temática, pueden dar un orden de magnitud para contextualizar y entender la situación en la que se encuentra Europa.

En cuanto a los 2 proyectos más significativos para este TFG extraídos del mismo documento del apartado 2.2 (informe de proyectos de I+D+I de España realizado por la plataforma tecnológica Española del hidrógeno y de las pilas de combustible del año 2021) para Europa y otros países son:


NOMBRE DEL PROYECTO	
Heavenn hydrogen energy applications for valley environments in Northern Netherlands	
WEB	ENTIDAD COORDINADORA
https://cordis.europa.eu/project/id/875090	New Energy Coalition
LOGO	
	
PRESUPUESTO	PERÍODO DE EJECUCIÓN
98.998.216,18 € (Financiados 20.000.000€)	1 enero 2020—31 diciembre 2025
RESUMEN CITADO	
<p><i>“HEAVENN es un proyecto de demostración a gran escala, reuniendo los elementos básicos: producción, distribución, almacenamiento y uso final local de H₂ en un "valle de H₂" totalmente integrado y en funcionamiento, que puede servir de modelo para su reproducción en toda Europa y fuera de ella.”</i></p>	

Tabla 2.3_01: Heavenn H₂ energy applications in Northern Netherlands

NOMBRE DEL PROYECTO	
HOASIS	
WEB	ENTIDAD COORDINADORA
-	TCI GECOMP
LOGO	
	

PRESUPUESTO	PERÍODO DE EJECUCIÓN
2.500 – 3.000 mill. €	5 años
RESUMEN CITADO	
<p><i>“Proyecto innovador en la zona de Antofagasta (Chile) que busca desarrollar el concepto de la economía circular basada en la economía del hidrógeno. Consiste en una producción a gran escala de hidrógeno verde, fertilizantes, reforestación, cultivo arbóreo, agricultura de acuaponía, valorización de residuos y creación de sinergias con las industrias locales. El proyecto HOASIS considera una planta para producción de energía solar fotovoltaica con una capacidad instalada de 3 GW y la instalación de una planta de electrólisis de 2.100MW con capacidad de generación de 40,3 tn de H₂ verde a la hora. El H₂ se empleará para diferentes usos: amonía, mobility, blending, ... que permita la interrelación de las industrias de la zona (minería, termoeléctricas a carbón, termoeléctricas a gas, plantas industriales, etc.). Asimismo, HOASIS contempla la repoblación forestal de la zona y la agricultura de precisión, mediante el cultivo de 2.000 Ha de invernadero con producción de 70 ton/ha Frutilla y 100 Ha para el cultivo de pistacho, más el estudio de implantación de un cultivo multitrófico para la optimización del sistema hidropónico.”</i></p>	

Tabla 2.3_02: HOASIS

Hasta ahora solo se ha hablado de proyectos que están en proceso de construcción, pero, ¿Existe alguna central de pilas de combustible de hidrógeno que proporcione energía eléctrica que esté operativa?.

AkzoNobel Industrial Chemicals (ANIC), Nedstack Fuel Cell Technology (NFCT), MTSA Technopower (MTSA), Johnson Matthey Fuel Cells Limited (JMFC) y Politecnico di Milano (Polmi), completaron en el 2016, la primera planta de energía de pila de combustible de H₂ PEM con una potencia instalada de 2 MW en Yingkou, China.



Imagen 2.3_06: Planta PEM 2 MW, Yingkou, China.

Algunos de los resultados obtenidos de la planta durante 2 años de pruebas fueron:

- 2 MW de potencia alcanzada en funcionamiento
- Calor disponible a 60 °C
- Alta eficiencia de conversión neta 50% de energía eléctrica a nivel del sistema y 80% para calor y energía combinados.
- Inversión demostrada por 3.000 € / kW_e.
- La planta produjo más de 13 GWh y puso a disposición 7 GWh de energía térmica a 65 °C.
- Se ha evitado la emisión de 15.000 toneladas de CO₂.

Cabe resaltar que las centrales de pilas de combustible que existen en Europa, se encuentran con una potencia entre 1 kW hasta 10 MW. El motivo de no incluirlos es porque su combustible no es el hidrógeno sino gas natural. El uso de gas natural hace que esta clase de infraestructuras sean más usuales y económicas. Como uno de los objetivos que se persigue es la descarbonización y esta clase de tecnología sigue emitiendo dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno, no se van a contemplar en este subapartado.

Finalmente si se habla sobre el tema de las normativas y regulaciones a nivel Europeo, sobre el hidrógeno como vector energético, hay que decir que no hay muchas directrices. Algunas de ellas son:

- 1) H. Europe, HyLaw: EU Policy paper, 2019.
- 2) O.J. of the E. Union, Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances, 2012.
- 3) O.J. of the E. Union, Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (recast), 2014.
- 4) O.J. of the E. Union, Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), 2015.
- 5) Official Journal of the European Union, Directive (EU) 2019/1161 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles, 2019.

Dichas regulaciones no contemplan algunas de las particularidades conocidas actualmente, como la generación mediante electrólisis (que no involucra la emanación de sustancias contaminantes o peligrosas), o la generación y el almacenamiento a pequeña escala (como sería el caso de las estaciones de repostaje). Es por ello que muchos de los esfuerzos que se están realizando son para el diseño y redacción de normativas que regulen este nuevo sector en auge. Sin ellas, no se puede dar vía libre a esta tecnología tan necesaria.

2.4 ¿Por qué apostar por el hidrógeno?

"Creo que un día el agua será un carburante. Que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados solos o conjuntamente, proporcionarán una fuente inagotable de energía y luz, con una intensidad que el carbón no puede; dado que las reservas de carbón se agotaran, nos calentaremos gracias al agua. El agua será el carbón del futuro". Este fragmento extraído de la novela de ficción "La Isla Misteriosa" de Julio Verne publicada en 1874 es muy conocido a la hora de hacer referencia al sector del hidrógeno.

Desde hace más de 147 años, ya se fantaseaba con la idea de usar el agua o más concretamente los elementos por los que está formada. Antes de hablar del hidrógeno hay que dejar claro varios conceptos principales. En primer lugar hay que saber diferenciar entre fuente de energía y vector energético. Una fuente de energía se podría definir como el recurso natural, sustancia o fenómeno capaz de producir cambios sobre la materia, en cantidad suficiente como para ser explotada por el ser humano para su beneficio. Entonces, ¿El hidrógeno es una fuente de energía? No. El hidrógeno es un vector energético. ¿Qué es un vector energético? Son todas aquellas sustancias o dispositivos capaces de almacenar y transportar energía, de tal manera que ésta pueda liberarse posteriormente de forma controlada donde se desee. ¿Qué vectores energéticos existen? Cualquier combustible existente es un ejemplo de vector energético. Incluso la electricidad, en esencia, es un vector energético porque se puede almacenar, transportar y liberar de forma controlada a voluntad.

El hidrógeno viene para quedarse ya que posee una serie de características particulares que lo convierten ideal para resolver el tema objeto del presente TFG. Este primer elemento de la tabla periódica, es el más abundante del universo y a pesar de que no se puede encontrar de forma aislada en la tierra por sus propiedades fisicoquímicas, se puede obtener en forma de gas. Existen 3 isótopos del elemento hidrógeno que son el protio, deuterio y tritio. A efectos prácticos lo que se maneja es el hidrógeno diatómico en forma de gas. Esta molécula formada por dos átomos de hidrógeno se puede representar como se muestra en la *Imagen 2.4_01* a continuación:

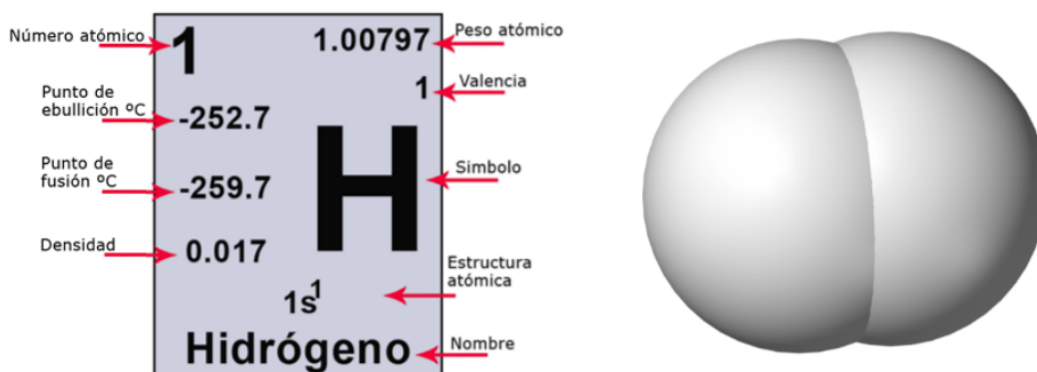


Imagen 2.4_01: Elemento hidrógeno de la tabla periódica y molécula de H₂.

En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, y es insípido, incoloro e inodoro. Su llama no es percibida por el ojo humano ya que emite en el espectro ultravioleta. A presión y temperatura ambiente no licua. Se caracteriza por tener un coeficiente Joule-Thomson negativo al igual que el helio. Este concepto en particular, se desarrollará más extensamente en el apartado de seguridad. La característica más significativa para el objeto de estudio, es quizás, que tiene casi 3 veces más energía que la mayoría de los combustibles comunes. Se combina fácilmente con el oxígeno, liberando una considerable cantidad de energía en forma de calor y su combustión no genera como subproductos CO_2 . Aunque es cierto que no genera dióxido de carbono en una combustión, si que es cierto que como el aire de la atmósfera de la tierra está formada por un 78% de nitrógeno, en reacciones de alta temperatura como es el caso, se genera una cantidad de óxidos de nitrógeno que no se puede despreciar. Como en este caso no se pretende quemar, este aspecto no es problema.

Las propiedades fisicoquímicas más técnicas, por decirlo de alguna forma, proporcionadas por la Asociación Española del Hidrógeno se han recogido en la *Tabla 2.4_01*. Los valores mostrados se usarán más adelante para realizar una serie de cálculos y obtener unos resultados.

DENSIDAD	0,0899 kg/Nm ³ (Gas) 0,00708 kg/L (Líquido)
PODER CALORÍFICO INFERIOR	120 MJ/kg
PODER CALORÍFICO SUPERIOR	141,86 MJ/kg
LÍMITES DE EXPLOSIÓN	4,0 - 75,0 % (Concentración de H ₂ en aire)
LÍMITES DE DETONACIÓN	18,3 - 59,0 % (Concentración de H ₂ en aire)
CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA	C _p = 14,199 kJ/(kg·K) C _v = 10,074 kJ/(kg·K)
COEFICIENTE DE DIFUSIÓN	0,61 cm ² /s

Tabla 2.4_01: Los números del hidrógeno

Conocidas ya las particularidades del gas hidrógeno, se procede a distinguir las fuentes de las cuales se han obtenido. No tiene el mismo impacto un hidrógeno extraído directamente del agua por medio de electrólisis, alimentado con energía eléctrica de recursos 100% renovables que si se extrae un hidrógeno del reformado de gas natural. La diferencia es que uno no contamina y el otro si. Es por ello que existe una designación de colores para la procedencia del hidrógeno. Como bien resume la imagen *Imagen 2.4_02*, existen 3 colores para su designación: verde, azul y gris. Siendo el verde el más limpio y el gris el más contaminante.

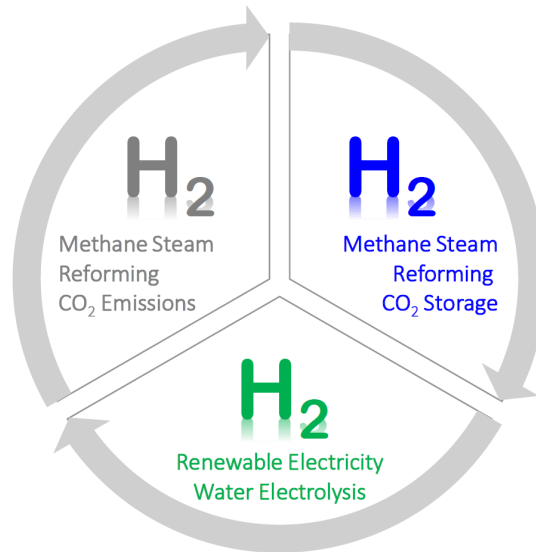


Imagen 2.4_02 : Colores del hidrógeno.

No obstante, ¿Quién regula esto?. Ante la ausencia regulatoria por parte de los gobiernos, el proyecto CertifHy se ha convertido en un estándar para garantizar el origen del hidrógeno verde en Europa. Desde noviembre de 2014 hasta octubre de 2016, el proyecto CertifHy identificó un marco que incluía una definición de hidrógeno verde y bajo en carbono con una propuesta detallada para su implementación. El proyecto fue financiado por FCU JU, la asociación público-privada que administra los fondos de H2020 asignados a tecnologías de hidrógeno y pilas de combustible. En definitiva determina las características de la producción del hidrógeno para catalogarlo en un color correspondiente.

- El hidrógeno gris se obtiene del reformado con vapor de combustibles fósiles como el carbón o el gas natural.
- El hidrógeno azul se produce mediante lo que se conoce como reformado con vapor de gas natural, es decir, la separación del gas natural en hidrógeno y CO₂. Posteriormente, el CO₂ no se libera a la atmósfera, sino que se almacena.
- El hidrógeno verde se produce mediante la electrólisis del agua, es decir, la descomposición de las moléculas de agua en los dos elementos individuales hidrógeno y oxígeno. Solo se utiliza electricidad procedente de energías renovables. De esta forma no se produce CO₂, lo que hace que el hidrógeno generado sea neutro para el clima.

La *Imagen 2.4_03* proporcionada por Ariema S.L explica más detalladamente los límites de esta categorización. Esta clasificación es un poco más compleja, porque si el hidrógeno se produjera por electrólisis pero la energía eléctrica proviene de un mix energético ya no se consideraría hidrógeno verde al completo. Como el objeto de estudio no es el de desglosar esta clasificación, es suficiente con la explicación realizada ya que para la aplicación del estudio, se necesitaría comprar directamente hidrógeno verde.

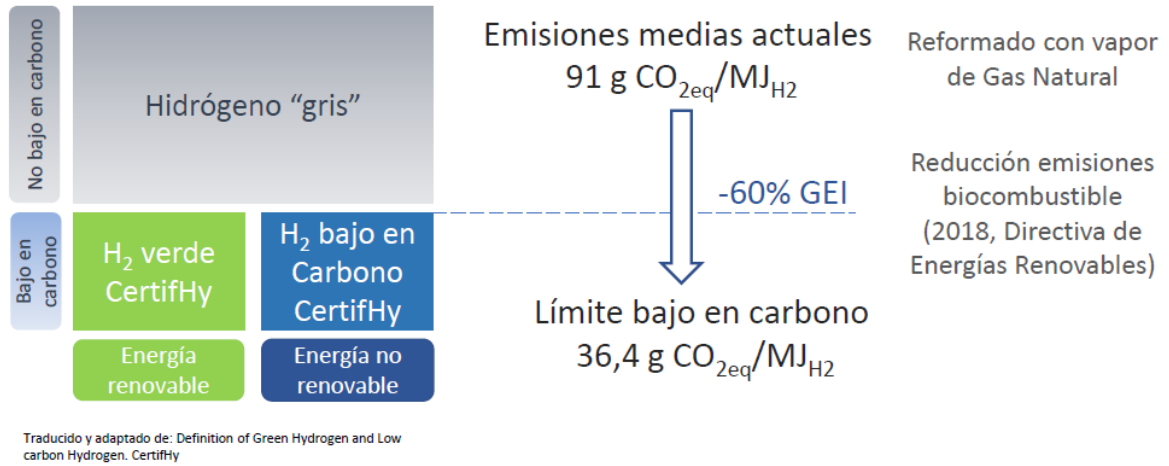


Imagen 2.4_03 : CertifHy.

¿Cómo se puede transportar y distribuir el hidrógeno?. A continuación se ha diseñado la *Tabla 2.4_02* donde se contesta a la pregunta.

Tanto si la producción de hidrógeno se realiza:	
Onshore (HydrogenPro)	Offshore (Neptune Energy)
El hidrógeno se puede transportar y distribuir por alguna de las siguientes formas	
Hidrógeno líquido en barcos	Hidrógeno gas por gasoductos

Hidrógeno gas en camiones (200, 350 y 700 bar)



Tabla 2.4_02: Transporte y distribución del hidrógeno

Otra forma que quizás se pueda plantear el/la lector/a quizás sea la de transportar el hidrógeno para hacerlo reaccionar con otros elementos, como por ejemplo, para formar metano (CH_4), Hidrato de metano ($(\text{CH}_4)_n(\text{H}_2\text{O})_{23}$), Amoníaco (NH_3), Hidracina (N_2H_4), Peróxido de hidrógeno (H_2O_2), Sulfuro de hidrógeno (H_2S), etc. En realidad, aunque uno/una piense que estos compuestos puedan servir como intermediario para poder almacenar hidrógeno por su alta cantidad de átomos de hidrógeno, no merece la pena, ya que se tendrían que realizar muchas transformaciones intermedias que aumentaría demasiado su coste y perdería todo el sentido inicial. Además son sustancias complejas de producir e incluso son perjudiciales para el medio ambiente.

Hablando por hablar, si se quisiera busca un compuesto donde habiten una gran cantidad de átomos de hidrógeno, la molécula ideal sería lo que se conoce comúnmente como azúcar procedente de biomasa o glucanos ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$). El proyecto Sweet Hydrogen del año 2013 realizado por Percival Zhang, profesor de bioingeniería en el Virginia Tech Institute, afirmaba que el problema no es sólo técnico sino que, a veces, **"los científicos tienen poca imaginación"**. Por eso planteó la siguiente pregunta: ¿Por qué no aprovechar un recurso natural abundante, el azúcar?. Esto surgió a raíz de la alta demanda de la Nasa para obtener hidrógeno para sus cohetes espaciales.

Todo esto comentado anteriormente, que no tiene practicidad real. Solo pretende justificar la gran problemática del hidrógeno actual a la hora de almacenarlo. Aunque las formas de almacenamiento se tratarán en su apartado más adelante, existen muchas alternativas que están bien pero que aún no terminan de ser lo suficientemente versátiles como para satisfacer la necesidad de transporte y distribución. En el presente TFG se seleccionan las opciones indicadas en la tabla *Tabla 2.4_02*. Más concretamente, como se indicará más adelante, el hidrógeno líquido transportado en barcos.

Otro motivo por el cual apostar por el hidrógeno es el gran potencial de generación de energías renovables que tiene España. Como muestra la gráfica *Imagen 2.4_04* realizada por la Fundación Naturgy en el Libro del hidrógeno "Vector energético de una economía descarbonizada" del año 2020:

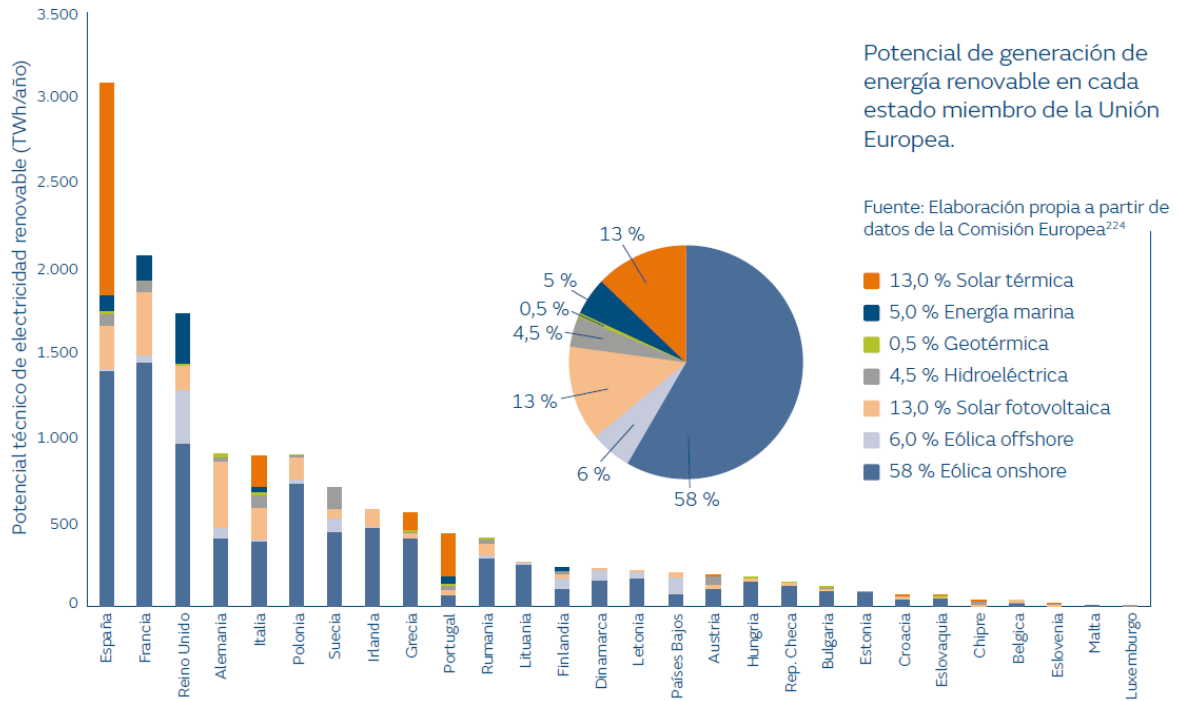


Imagen 2.4_04: Potencial renovables, Unión Europea, Fundación Naturgy.

Se observa que España encabeza el primer lugar, de todos los estado miembros de la Unión Europea. ¿Si Alemania ostenta el cuarto lugar, y aplica el res curtailment junto con la electrolización del hidrógeno, porque España no? Es cierto que España cada vez se está poniendo más “las pilas”, pero si esta clase de oportunidades no se aprovechan, su posición estratégica en el sector será reemplazada por otros países que sí que lo hagan.

Para cerrar este subapartado, no se puede concluir sin mencionar el informe realizado en el 2013 por la Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las Pilas de Combustible llamado “Expectativas de creación de empleo en hidrógeno y pilas de combustible en España”. Como muestra la *Tabla 2.4_03* resumen, se podría llegar hasta 180.000 empleos directos en España.

Potencial económico de la tecnología del hidrógeno en España. Creación de empleo directo neto (horizonte 2030-2035)		Empleos directos en España
HyWays para España	Aprendizaje rápido y apoyo muy alto - 2030	180.000
	Escenario <i>Optimistic</i>	125.000

Tabla 2.4_03: Empleo España PTE HPC 2030-3035

¿Es el hidrógeno la panacea? Hay gente que piensa que no, pero los científicos y técnicos que si defienden su potencial, piensan que puede resolver una gran variedad de problemas actuales. A efectos prácticos, es solo otro combustible, que hay que seguir trabajando en él, para que pueda llegar a ser viable a corto o medio plazo.

Capítulo 3

3 Situación de la isla de El Hierro

En este capítulo se abordan todas las dimensiones que contextualizan al lector/a sobre la isla de El Hierro. Indispensable para entender en concepto de la isla, El Hierro es un banco de pruebas, de referencia mundial en cuanto a energías renovables.

Tiempo de lectura 15 min aprox

3.1 ¿Por qué la isla de El Hierro?

“La convivencia entre el crecimiento económico y la conservación del entorno es posible. Pero sobre todo, es necesaria para poder vivir de cara al futuro”, la frase célebre del pintor, escultor y artista español Cesar Manrique Cabrera, ya lo dice todo. Firme defensor de los valores medioambientales de las islas Canarias, fusiono lo que mejor se le daba hacer con esa conciencia de sostenibilidad con la que afirma en su frase. Con ello, no hay mejor forma para presentar la isla de El Hierro, la más pequeña del archipiélago Canario y la más alejada de la península.



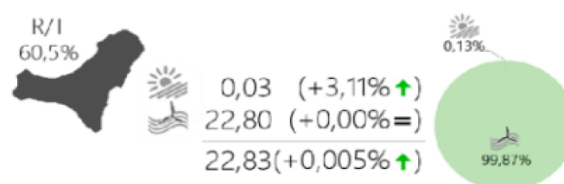
Imagen 3.1_01: Archipiélago Canario

En la Imagen satelital *Imagen 3.1_01* tomada desde el espacio por los satélites MODIS y de la ESA el 13 de octubre del 2011, muestra las 7 islas Canarias, donde aparece El Hierro en la esquina inferior izquierda. Ésta isla pionera en todo el mundo, apostó hace años por convertirse en una isla sostenible. A día de hoy, con la central de Gorona del viento en funcionamiento, se ha convertido en un laboratorio referente de energías renovables.

Desde su electrificación en los años 70 haciendo uso de combustibles fósiles, pasando por su central térmica de Llanos Blancos, hasta la actual central hidroeléctrica de Gorona del viento, se ha proporcionado energía a toda la isla. Es cierto que popularmente se cree que es una isla 100% renovables los 365 días del año y que excepcionalmente se encienden los grupos diesel-oil para suplir las inconstancias de las energías renovables. Eso no es del todo cierto, solo unos pocos días de todo el año, bajo ciertas condiciones especiales, sucede. Si se analizan las gráficas donde aparecen las fuentes de energía proporcionadas por Red Eléctrica Española, la mayoría de los días del año, existe una pequeña producción de energía eléctrica proveniente de recursos fósiles.

Más aspectos como la calidad del suministro de energía en la isla, donde aparecen microcortes o insuficiencia en el tiempo de respuesta para el suministro de energía eléctrica tras la inconstancia de los recursos renovables, crea la necesidad de resolver esta clase de problemas técnicos en la ingeniería eléctrica. No solo la preservación del medio ambiente de la isla, sino que, si también se desea mantener el fomento de una movilidad eléctrica, por ello no tiene sentido seguir usando los combustibles fósiles. Estos y muchos más, son los principales motivos que sostienen el objeto de estudio del presente TFG, tal y como se indica en el título y en su resumen.

Un estudio realizado por La Asociación eólica Canaria (EOLICAN), en octubre del 2020 llamado “Estudio para la maximización de la integración de renovables en los sistemas canarios” determinó que las características del Sistema Eléctrico Canario tiene elevados coste degeneración basado por el consumo de derivados del petróleo. Es decir que a pesar de los esfuerzos por apostar por las renovables en la isla, sigue teniendo el coste la energía eléctrica prácticamente al mismo precio que en la península. Otro dato significativo del estudio es que en la isla, con datos a fecha del año 2018, la potencia instalada de renovables no ha incrementado significativamente como se muestra seguidamente:



Unidades: Megavatios (MW)

Imagen 3.1_02: Potencia Eléctrica E.E.R.R 2018

Como conclusión de ese estudio, indica que Canarias supone una oportunidad única para mostrar la capacidad de participación de las renovables en la operación técnica del sistema y que se tiene que ampliar la realización de proyectos en las islas. Finalmente concluye que para poder sustituir los derivados del petróleo hay que hacer uso del hidrógeno. Todo esto fundamentado en el informe de la International Renewable Energy Agency (IRENA) del 2018 llamado "Hydrogen for renewable energy". Como muestra la siguiente *Imagen 3.1_03* adaptado por ARIEMA para la AeH2:

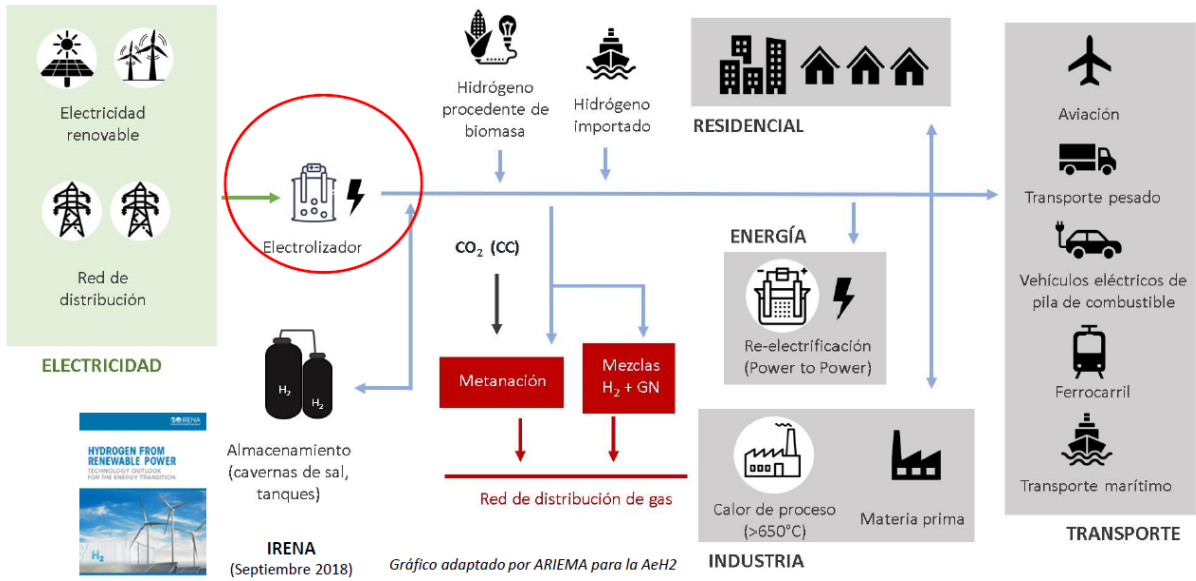


Imagen 3.1_03: Integración de E.E.R.R. en usos finales mediante hidrógeno

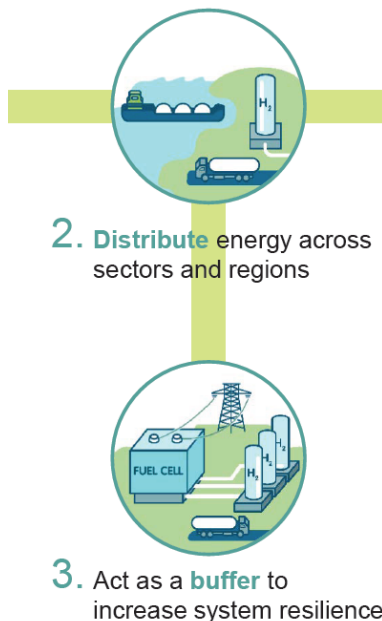


Imagen 3.1_04: Esquema objeto TFG (Hydrogen Council)

Lo que se pretende de alguna forma en cuanto al objeto del TFG es comprar hidrógeno verde, almacenarlo en la isla de El Hierro y usarlo para la producción de energía eléctrica por medio de pilas de combustible.

Con todo ello, se llegaría a conseguir todo lo comentado en los apartados anteriores. Debido a su gran complejidad, el TFG dará respuesta de forma teórica a como podría llegar a ser la infraestructura necesaria.

No obstante, es igual de importante determinar qué necesitan las tecnologías del hidrógeno para poder descarbonizar el Sistema Eléctrico de Potencia de la isla de forma más o menos competitiva.

3.2 Descripción de la Isla de El Hierro



Imagen 3.2_01: Geología de El Hierro

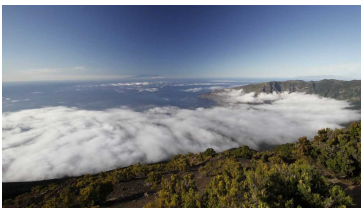


Imagen 3.2_02: Clima de El Hierro



Imagen 3.2_03: Biodiversidad de El Hierro



Imagen 3.2_04: Municipios de El Hierro

- ★ La isla de El Hierro tiene una superficie de 268,71 kilómetros cuadrados. Su pico más alto es el Malpaso, con 1.501 metros de altitud.
- ★ La isla cuenta con la mayor densidad de volcanes de Canarias, con más de 500 conos a cielo abierto y otros 300 cubiertos por coladas más recientes.
- ★ Posee alrededor de 100 cuevas y tubos volcánicos catalogados.
- ★ Cielos claros, escasas precipitaciones y un sol radiante. Estas son las principales características que definen el clima tropical de El Hierro.
- ★ De forma relativamente constante, los vientos alisios impactan en la isla, condensando la humedad en sus laderas.
- ★ Su temperatura media anual suele ser de 20 °C.
- ★ El Garoé, fue el árbol sagrado de los bimbaches o antiguos habitantes de El Hierro. Con su copa rodeada de nubes, más los vientos alisios, hace que caigan gotas de agua.
- ★ Las características geológicas del fondo submarino, hacen que exista un paisaje submarino muy variado.
- ★ El símbolo natural de la isla de El Hierro es su lagarto gigante de especie endémica.
- ★ La isla tiene una población de 10.968 habitantes para el año 2019.
- ★ Su población está repartida en 3 municipios: El Pinar, Frontera y Valverde.
- ★ Su capital es Valverde, donde, aparte de La Villa (casco urbano), también se encuentran el Puerto de La Estaca y el aeropuerto insular.
- ★ Las principales actividades económicas son históricamente el sector primario como principal pilar y el sector turístico en los últimos años.

3.3 Espacios naturales

El apartado de espacios naturales es interesante tenerlo presente, ya que, en base a él, se fundamenta la red de distribución de energía eléctrica de la isla. ¿Por qué sus espacios están protegidos? La isla posee las siguientes reconocimientos:

- 1997 Plan de desarrollo sostenible por el Cabildo de El Hierro.

Citando la web de el Cabildo de El hierro: ***“El Plan incluye la apuesta por políticas 100% residuos cero; 100% productos ecológicos; un plan de Movilidad Sostenible; desarrollo del sector turístico respetuoso con el medio; el fomento y conservación de su acervo patrimonial y cultural; la protección de su Medio Ambiente (el 68% de su territorio está protegido por Ley a través de diversas figuras de protección), la apuesta por lograr la autosuficiencia energética con fuentes renovables a través de la construcción de una central hidroeléctrica; entre otros.”***

- 21 de enero de 2000 la Unesco declara Reserva Mundial de la Biosfera.

Citando la web del Cabildo de El Hierro: ***“Las Reservas de la Biosfera son territorios cuyo objetivo es armonizar la conservación de la diversidad biológica y cultural y el desarrollo económico y social a través de la relación de las personas con la naturaleza. Se establecen sobre zonas ecológicamente representativas o de valor único, en ambientes terrestres, costeros y marinos, en las cuales la integración de la población humana y sus actividades con la conservación son esenciales.”***

- Septiembre de 2014 Red Europea y global de Geoparques de la Unesco.

Con esta última distinción, los herreños pretenden aprovechar mejor el patrimonio geológico como recurso didáctico y geoturístico internacional, beneficiándose de las herramientas de promoción y gestión de la Red Europea de Geoparques y la Red Global.

Dentro de las zonas de máxima protección se encuentra la Reserva Natural Integral Roques de Salmor donde habita el lagarto de El Hierro, la Reserva Natural Especial de Tibataje y la Reserva Natural Mencáfete como espacios terrestres. En la parte marítima, cuenta con la Reserva Marina de Punta de la Restinga y el Mar de las Calmas. Además de estos, existe el Parque Rural de Frontera y el monumento natural de Las Playas. La zona especial para la protección de las aves, es El Paisaje Protegido de Ventejís. Finalmente no se puede olvidar de El Paisaje Protegido de Timijiraque.

3.4 Plan Energético de Canarias 2006-2015

Para ir entrando en materia y antes de empezar a hacer nada, se tiene que hablar de los Planes Energéticos de Canarias extraídos de la web de El cabildo, para contextualizarse sobre las islas, más concretamente en la de El Hierro.

En cuanto a la situación actual del sector energético se resumen unos cuantos aspectos relevantes en los siguientes puntos:

- Canarias tiene una vulnerabilidad energética muy superior a la del conjunto de España que es, a su vez, muy superior a la de la media de la Unión Europea.
- El importante crecimiento del consumo de energía asociado a las emisiones de CO₂, exige aquellas energías con baja o nula producción de CO₂.
- Es necesario incorporar de manera más profunda la dimensión medioambiental en todas las decisiones relevantes en materia energética.
- Canarias ha tenido históricamente una menor calidad del suministro eléctrico, justificada en la fragmentación de mercados, y otros factores geográficos y orográficos que introducen unos extracostes de suministro al cliente final.
- Las posibilidades teóricas de aumentar la competencia en los mercados energéticos de Canarias son mucho más limitadas que en el resto del territorio Español.
- La fiscalidad diferenciada para Canarias, ampara en una norma legal de más de 100 años de vigencia y aceptada por la Unión Europea.
- Planificación insuficiente para Canarias y planificación uniforme para el conjunto de España en los sectores de electricidad y gas natural, que no puede tomar una suficiente consideración a las especiales características de las Islas.

Los principales objetivos del PECAN para los años 2006-2015 están englobados en 4 grupos como se muestra en la *Imagen 3.4_01* siguiente:

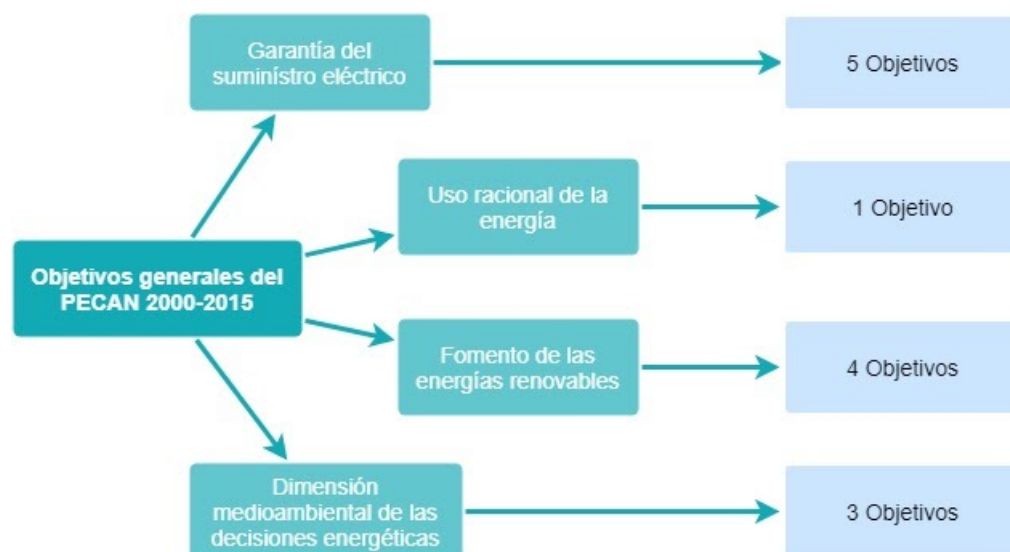


Imagen 3.4_01: Agrupación de objetivos PECAN 2006-2015 (elaboración propia)

Los objetivos relacionados con la garantía del suministro de energía son:

- 1) Diversificación de fuentes energéticas y potenciación de fuentes autóctonas.
- 2) Mantenimiento de unas adecuadas reservas estratégicas de hidrocarburos.
- 3) Existencia de suficiente capacidad de reserva en el sector energético de acuerdo con los valores previstos en el PECAN.
- 4) Obligaciones del servicio público y calidad del servicio.
- 5) Compensación de extracostes en los sectores de la electricidad y el gas natural.

Los objetivos relacionados con el uso racional de la energía son:

- 1) Reducir en un 25% en términos constantes en el año 2015 respecto los valores del año 2004 el ratio entre energía y PIB.

Los objetivos relacionados con el fomento de las energías renovables son:

- 1) Participación del conjunto de fuentes renovables en el abastecimiento energético y en la generación de electricidad.
- 2) Energía eólica.
- 3) Energía solar térmica y fotovoltaica.
- 4) Otras energías renovables (Minihidráulica, solar termoeléctrica, energía de las olas y biocombustibles).

Los objetivos relacionados con la dimensión medioambiental de las decisiones energéticas son:

- 1) Limitar el crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo de energía, a un 25% para el año horizonte de 2015 en comparación con los valores base para 1990.
- 2) Integrar la dimensión energética de la directiva de IPPC en la puesta en aplicación de los Objetivos de PECAN.
- 3) Aumentar la transparencia en la adopción de decisiones relativas a nuevas infraestructuras energéticas.

Estos objetivos en parte, hacen referencia al crecimiento de consumo de energía eléctrica como se muestra, para el caso objeto de estudio, de la isla de El Hierro. Como se puede observar en el gráfico presentado de la *Imagen 3.4_02* extraído del PECAN 2007-2015, se estima para el año 2015, un consumo anual de casi 55 GWh para el posible escenario 2. Los 3 posibles escenarios consisten en unos máximos, medios y mínimos de posibles situaciones para cada año estimado.

Previsión del consumo final de energía eléctrica. El Hierro

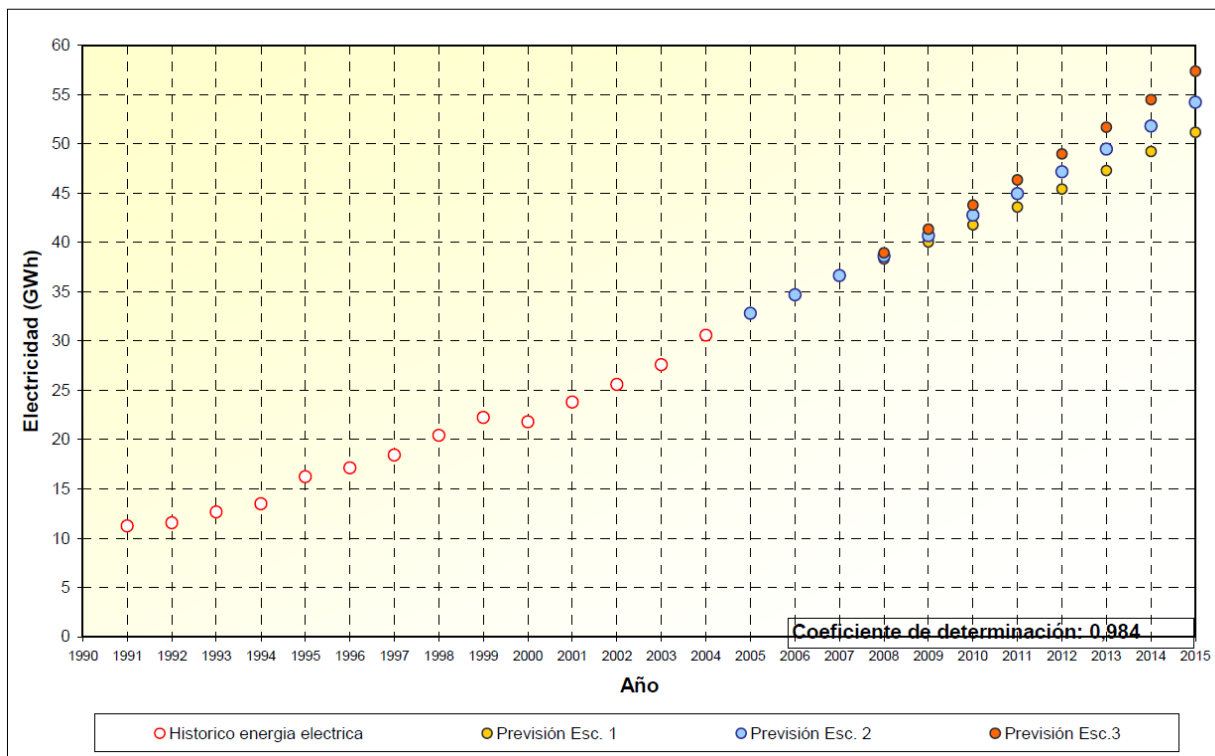


Imagen 3.4_02: Previsión del consumo final de energía eléctrica El hierro

Finalmente concluir con las síntesis tecnológicas energéticas respecto al hidrógeno que plantea el PECAN. Afirma que los costes de inversión en almacenamiento y pilas de combustible están entre 2.000 y 9.000 €/kW según la tecnología empleada.

Capítulo 4

4 Determinación del Sistema Eléctrico de Potencia de la Isla de El Hierro

En este capítulo se determinan las características de la generación, distribución y transporte de la isla. ¿Con qué finalidad?. Con la de poder simular y comprender como se comporta su Sistema Eléctrico de Potencia.

Tiempo de lectura 25 min aprox

4.1 Definición general de sistemas de energía eléctrica

Un sistema de energía eléctrica se define como el conjunto de instalaciones, conductores y equipos necesarios para la generación, el transporte y la distribución de la energía eléctrica. El crecimiento de los sistemas eléctricos ha avanzado tanto hasta el punto de considerar el consumo de energía eléctrica como uno de los indicadores más claros del grado de desarrollo de un país.

Estos sistemas, abarcan los aspectos técnicos y económicos entre los que se entrelazan junto a las normas reguladoras y legales para poder así garantizar el suministro de energía eléctrica a los consumidores.

Debido a que la energía eléctrica no es almacenable a grandes escalas como se ha comentado en apartados anteriores, la operación y gestión de un sistema eléctrico, implica generar lo mismo que se consume instantáneamente. Esto crea la tan conocida curva de demanda diaria. En el caso de la isla de El Hierro, se van a describir como son estos 3 sectores que caracterizan al sistema de energía eléctrica de la isla.

4.2 Generación de energía en la isla de El Hierro

Las centrales eléctricas que proporcionan energía a toda la isla son 2: La Central Hidroeléctrica de Gorona del Viento y la central térmica de Llanos Blancos. Como se pueden apreciar en las imágenes, una aprovecha recursos renovables y la otra hace uso de combustibles fósiles.



Imagen 4.2_01: Gorona del Viento



Imagen 4.2_02: Llanos blancos

En los siguientes apartados se van a describir respectivamente todas las características de las centrales eléctricas que abastecen el consumo de la isla.

4.2.1 Central Hidroeléctrica Gorona del Viento

“Gorona del Viento El Hierro, S.A., es la empresa encargada de la gestión, explotación y mantenimiento de la Central Hidroeléctrica de El Hierro. Una instalación cuyo objetivo es abastecer a la Isla del Meridiano de energía eléctrica a partir de fuentes limpias y renovables como el agua y el viento.” Tal y como indica su web, la central posee un parque eólico, una central hidráulica y una estación de bombeo. Con esas 3 infraestructuras forma el triángulo perfecto para la generación y almacenamiento de energía proveniente de recursos renovables.



Imagen 4.2.1_01: Parque Eólico



Imagen 4.2.1_02: Central Hidráulica



Imagen 4.2.1_03: Estación de bombeo

4.2.1.1 Características del parque Eólico

Las características que definen el parque Eólico de Gorona del Viento viene resumidas en la siguiente *Imagen 4.2_04* de elaboración propia. Consta de 5 aerogeneradores Enercon con una potencia instalada de 11,5 MW totales. Con una velocidad del viento nominal de 15,5 m/s, se puede generar a la hora 2,3 MWh de energía por aerogenerador.

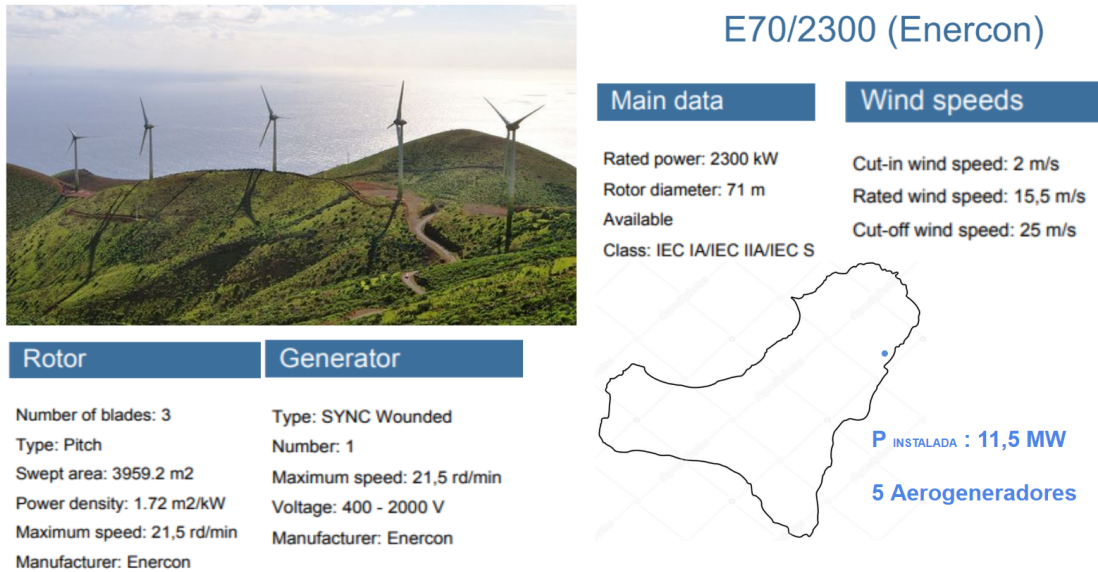


Imagen 4.2.1.1_01: Características Parque Eólico

Su ubicación estratégica según el plano PDS-3_EOLICO obtenido de la web del Cabildo de El Hierro, establece un equilibrio entre la zonas naturales protegidas, la proximidad a la central térmica de Llanos Blancos y la velocidad del viento de su emplazamiento. Según el plano, la velocidad media anual del lugar (azul claro) está comprendida entre 8,5 y 9,5 m/s.

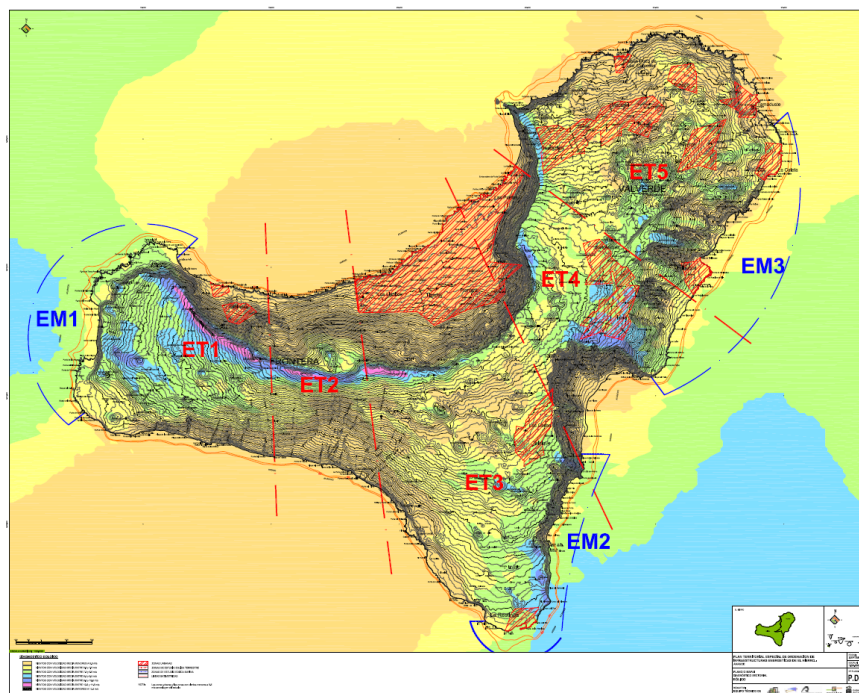


Imagen 4.2.1.1_02: PDS-3_EOLICO

4.2.1.2 Características de la central Hidráulica

La central hidráulica está compuesta por dos embalses, uno superior y uno inferior que almacenan agua. En el embalse inferior, se encuentran las turbinas Pelton que son las encargadas de transformar la energía cinética y potencial del agua en electricidad. El salto bruto entre depósitos es de 655 m.



Depósito superior
de 380.000 m³

Imagen 4.2.1.2_01: Depósito superior



Depósito inferior
de 150.000 m³

Imagen 4.2.1.2_02: Depósito inferior



Imagen 4.2.1.2_03: Conducciones

USO	LONGITUD [m]	DIÁMETRO CONDUCCIONES [m]
Turbinación	2350	1
Impulsión	3015	0,8

Tabla 4.2.1.2_01: Características conducciones

Respecto a la generación eléctrica, hay 4 turbinas Pelton con volantes de inercia de la marca Andritz, cada una de 2,83 MW, con una potencia total instalada de 11,32 MW. Su caudal de funcionamiento está comprendido entre 0,5 y 2 m³/s en conjunto.



Imagen 4.2.1.2_04: Turbinas Pelton

4.2.1.3 Características de la estación de bombeo

En momentos donde hay una baja demanda de energía o se genera más energía de la que se consume, ésta es usada en la estación de bombeo para llenar el depósito superior de agua. Como se muestra en la *Imagen 4.2.1.3_01* de elaboración propia, el grupo de bombeo está compuesto por un total de 6 MW de potencia instalada.



Imagen 4.2.1.3_01: Características de la estación de bombeo

4.2.1.4 Estimación del rendimiento global

Para poder comparar más adelante el rendimiento global de la central Hidráulica, más la estación de bombeo como un solo elemento, a modo de "batería", con otras tecnologías, se va a estimar de forma aproximada su rendimiento. Indicar previamente que, este valor no será constante en la realidad, ya que según los modos de operación, las necesidades de consumo de la isla y otras variables como la constancia del viento en el parque Eólico, harán que fluctúe su valor.

En primer lugar se va a determinar durante cuánto tiempo se va a poder suministrar la máxima energía posible, para ello se parte del supuesto de que el depósito inferior nunca va a estar completamente vacío. Esto es para que no entre aire en los grupos de bombeo. Como se desconoce cuál puede ser su valor real, se parte de un valor de 1.000 m³ de agua como mínimo. Partiendo de la ecuación del caudal, se pretende obtener el tiempo en el que tarda en llenarse el depósito inferior.

$$Q = \frac{V}{T}$$

Q → Caudal en [m³/s]
 V → Volumen en [m³]
 T → Tiempo en [s]

$$2 = \frac{149.000}{T} ; T = 74500 \text{ s} \rightarrow T = 20\text{h } 41 \text{ min Generando energía}$$

Sustituyendo valores y despejando el tiempo, se ha obtenido que podría proporcionar su máxima energía alrededor de 20 horas y 41 minutos. No es capaz de proporcionar energía por al menos 24 horas. Es cierto que si el caudal disminuye el tiempo crecerá, pero ya no aportará la máxima energía, ya que cada turbina Pelton es capaz de admitir hasta 0,5 m³/s.

A continuación se va a obtener la potencia hidráulica máxima teórica capaz de almacenar en el depósito superior. Para ello se aplicará la expresión de la potencia hidráulica.

$$P_{\text{HIDRÁULICA}} = \gamma \cdot Q \cdot h$$

$P_{\text{HIDRÁULICA}}$ → Potencia hidráulica [W]
 γ → Peso específico del agua [N/m³]
 Q → Caudal en [m³/s]
 h → Salto bruto [m]

$$P_{\text{HIDRÁULICA}} = 9,81 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 655; P_{\text{HIDRÁULICA}} = 12.851,1 \text{ kW}$$

La potencia hidráulica es de 12.851,1 kW. Para obtener la energía que es capaz de extraer los 4 grupos Pelton se necesita conocer varios rendimientos o pérdidas que existe dentro de la instalación. Como estos valores también se desconocen, se van hacer uso de los típicos para esta clase de centrales de minihidráulica. Los valores que se han tomado son:

- Rendimiento manométrico = 0,96
- Rendimiento volumétrico = 0,995
- Rendimiento mecánico = 0,99
- Rendimiento generador = 0,93

Antes de continuar se van a explicar qué significan estos rendimientos:

El **rendimiento manométrico** es la relación entre la energía entregada en el eje de la turbina y la hidráulica absorbida por el rodete. Suelen estar asociadas a pérdidas por rozamiento, y cambios de dirección.

El **rendimiento volumétrico** es la relación entre el caudal real y el teórico debido al desgaste y a la estanquidad de la turbina.

El **rendimiento mecánico** contempla las pérdidas por fricción, transmisión, alimentación de elementos auxiliares, etc de la turbina.

El **rendimiento del generador** cuantifica las pérdidas de energía interna del generador.

Tras tener todos los conceptos claros, se procede a la obtención de la potencia del generador o la potencia útil que se extraerá de la central hidráulica. Para ello, se aplican los rendimientos mencionados anteriormente a la potencia hidráulica calculada:

$$P_{\text{útil}} = P_{\text{HIDRÁULICA}} \cdot \eta_{\text{man}} \cdot \eta_{\text{vol}} \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{gen}}$$

$P_{\text{útil}} \rightarrow$ Potencia útil [kW]
 $P_{\text{HIDRÁULICA}} \rightarrow$ Potencia hidráulica [W]
 $\eta_{\text{man}} \rightarrow$ Rendimiento manométrico
 $\eta_{\text{vol}} \rightarrow$ Rendimiento volumétrico
 $\eta_{\text{mec}} \rightarrow$ Rendimiento mecánico
 $\eta_{\text{gen}} \rightarrow$ Rendimiento generador

$$P_{\text{útil}} = 12.851,1 \cdot 0,96 \cdot 0,995 \cdot 0,99 \cdot 0,93; P_{\text{útil}} = 11.302,5 \text{ kW}$$

La potencia útil obtenida de 11.302,5 kW tiene sentido. Si se compara con el valor proporcionado por Gorona del viento, se puede observar que prácticamente es el mismo. Si se multiplican todos los rendimientos se obtiene el rendimiento de la central hidráulica. Su valor es del 87,95 %. Eso quiere decir que el 12,05% de la energía almacenada se pierde o mejor dicho, es el precio a pagar por la energía obtenida.

Para obtener el rendimiento de la estación de bombeo, también de forma aproximada, hace falta saber que la conducción de impulsión, están reguladas por 2 válvulas de caudal mínimo. Estas válvulas protegen a los grupos de bombeo y aseguran un caudal mínimo de circulación. Son de 6 y 10 pulgadas, y cada una asegura un caudal de 0,0583 y 0,1777 m³/s. Estos valores han sido obtenidos por la Empresa Unitecno, responsable de su instalación como indica en su web.

Las válvulas de 6 pulgadas corresponden con las bombas de 500 kW (6 und) y las válvulas de 10 pulgadas corresponden con las bombas de 1.500 kW (2 und). Por ello, el caudal mínimo de bombeo será:

$$(6 \cdot 0,0583) + (2 \cdot 0,17777) = 0,705 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ahora haciendo uso de la expresión de potencia hidráulica y de la expresión que define el rendimiento ($P_{\text{útil}} / P_{\text{total}}$), se puede obtener el rendimiento global del grupo de bombeo de la siguiente forma:

$$\eta_{\text{global de bombeo}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot h}{P_{\text{consumo bombeo}}}$$

$\eta_{\text{global bombeo}} \rightarrow$ Rendimiento bombeo
 $\gamma \rightarrow$ Peso específico del agua [N/m³]
 $Q \rightarrow$ Caudal en [m³/s]
 $h \rightarrow$ Salto bruto [m]
 $P_{\text{consumo bombeo}} \rightarrow$ Potencia bombeo [W]

$$\eta_{\text{global de bombeo}} = \frac{9,31 \cdot 10^3 \cdot 0,705 \cdot 655}{6 \cdot 10^6}; \eta_{\text{global de bombeo}} = 0,7550$$

El valor obtenido de 75,50% como rendimiento global de bombeo, significa que de la energía que se consume, solo se almacenará el porcentaje calculado.

Con todos estos números obtenidos, es hora de plantearse la siguiente pregunta, ¿Cuál será el rendimiento del conjunto “generador-batería” de la Gorona del viento?

$$0,8795 \cdot 0,7550 = 0,6642 \rightarrow 66,42 \% \text{ Rendimiento del conjunto}$$

Este es el rendimiento de almacenar y posteriormente verter la energía a la red de la isla. Estas estimaciones son valores ideales para dar un orden de magnitud. En la realidad serán inferiores ya que no trabajan siempre en las mismas condiciones.

4.2.2 Central térmica Llanos Blancos

La Central Diésel de Llanos Blancos pertenece al Grupo ENDESA. Está situada en la costa este de la isla de El Hierro, en el término municipal de Valverde, de cuyo casco urbano está a una distancia de unos 10,5 km. Se encuentra en las proximidades de la Playa de Tijeretas entre el Puerto de la Estaca y la Punta de Timijiraque.

Tiene una potencia instalada en la actualidad de 14,94 MW y su rendimiento neto es de 38,2%. Tiene una superficie plana de 583 m², se encuentra a 6 metros sobre el nivel del mar y su combustible es el diesel oil. Toda la información que se describe a continuación se ha extraído de la declaración ambiental realizada por ENDESA para la central en el año 2018.



Imagen 4.2.2_01: Vista completa Central Llanos Blancos

En los subapartados que vienen a continuación se van indicar las características de los grupos generadores existentes y de su sistema de almacenaje.

4.2.2.1 Características de los grupos generadores

Existen 11 grupos generadores. Sus datos y características se han conglomerado de una serie de tablas de elaboración propia para facilitar su lectura. Debido a que los datos a los que se hace referencia, pertenecen a la información que se ha hecho pública, no se han encontrado todos los que se deseaban. No obstante, son lo suficientemente completos, como para comprender la infraestructura existente.

Grupos	Potencia Nominal eléctrica bruta (kWe)	Marca	Motor	Alternador síncrono
Motor Diésel LD 7	780	CATERPILLAR	-	-
Motor Diésel LD 9	1.100	CATERPILLAR	Caterpillar-351 6 DI-TA	CAT-SE-1
Motor Diésel LD 10	1.460	CATERPILLAR	CAT 3516	SR4
Motor Diésel LD 11	1.460	CATERPILLAR	CAT 3516	SR4
Motor Diésel LD 12	1.460	CATERPILLAR	CAT 3516	SR4
Motor Diésel LD 13	1.460	CATERPILLAR	-	-
Motor Diésel LD 14	2.000	MAN	-	-
Motor Diésel LD 15	2.000	MAN	-	-
Motor Diésel LD 16	1.940	MAN	-	-
Motor Diésel Móvil 1	1.280	CATERPILLAR	Caterpillar-351 6 DI-TA	SR4

Tabla 4.2.2.1_01: Tabla resumen de grupos generadores

Resaltar que poseen un motor diésel móvil, con el que cubren los apagones puntuales o reparaciones en la isla. Cuando se tiene que abrir algún tramo de la red de distribución para realizar un mantenimiento se lleva el grupo electrógeno a la zona en cuestión de la isla y así asegurar el suministro eléctrico.

Otras características más puntuales de los grupos generadores son:

Motor Diésel LD 7		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
780 kW	875 kVA	1.000 kVA
1.000 rpm	1.000 rpm	400/22.000 V

Tabla 4.2.2.1_02: Motor Diésel LD 7

Motor Diésel LD 9		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
1.100 kW	- kVA	2.000 kVA
- rpm	- rpm	380/20.000 V

Tabla 4.2.2.1_03: Motor Diésel LD 9

Motor Diésel LD 10		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
1.460 kW	- kVA	2.000 kVA
- rpm	- rpm	400/22.000 V

Tabla 4.2.2.1_04: Motor Diésel LD 9

Motor Diésel LD 11		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
1.460 kW	- kVA	2.000 kVA
- rpm	- rpm	400/22.000 V

Tabla 4.2.2.1_05: Motor Diésel LD 11

Motor Diésel LD 12		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
1.460 kW	1.825 kVA	2.000 kVA
1.500 rpm	1.500 rpm	400/22.000 V

Tabla 4.2.2.1_06: Motor Diésel LD 12

Motor Diésel LD 13		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
1.460 kW	1.850 kVA	2.000 kVA
1.500 rpm	1.500 rpm	- V

Tabla 4.2.2.1_07: Motor Diésel LD 13

Motor Diésel LD 14		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
2.000 kW	- kVA	- kVA
1.000 rpm	1.000 rpm	6,3/20 kV

Tabla 4.2.2.1_08: Motor Diésel LD 14

Motor Diésel LD 15		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
2.000 kW	- kVA	- kVA
1.000 rpm	1.000 rpm	6,3/20 kV

Tabla 4.2.2.1_09: Motor Diésel LD 15

Motor Diésel LD 16		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
- kW	- kVA	- kVA
- rpm	- rpm	- V

Tabla 4.2.2.1_10: Motor Diésel LD 16

Motor Diésel móvil 1		
MOTOR	ALTERNADOR	TRAFO
1.280 kW	- kVA	2.000 kVA
1.500 rpm	- rpm	400/22.000 V

Tabla 4.2.2.1_11: Motor Diésel móvil 1

Para hacerse una idea de qué aspecto tienen estos grupos generadores, a continuación se muestra la *Imagen 4.2.2.1_01* :

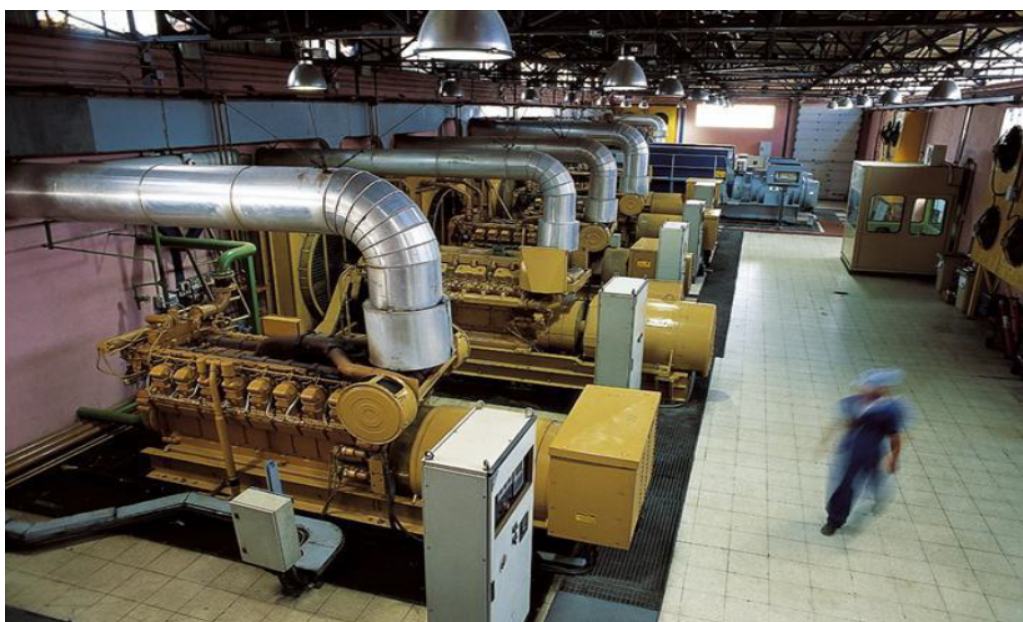


Imagen 4.2.2.1_01: Interior Central Llanos Blancos

4.2.2.2 Características del sistema de almacenaje

Para el sistema de almacenamiento de combustible y aceites se ha diseñado un diagrama donde recoge toda la información imprescindible sobre este apartado. Resaltar que existen 2 zonas de almacenamiento: la norte y la sur con una capacidad total de almacenaje de 660 m³ para el diesel oil.

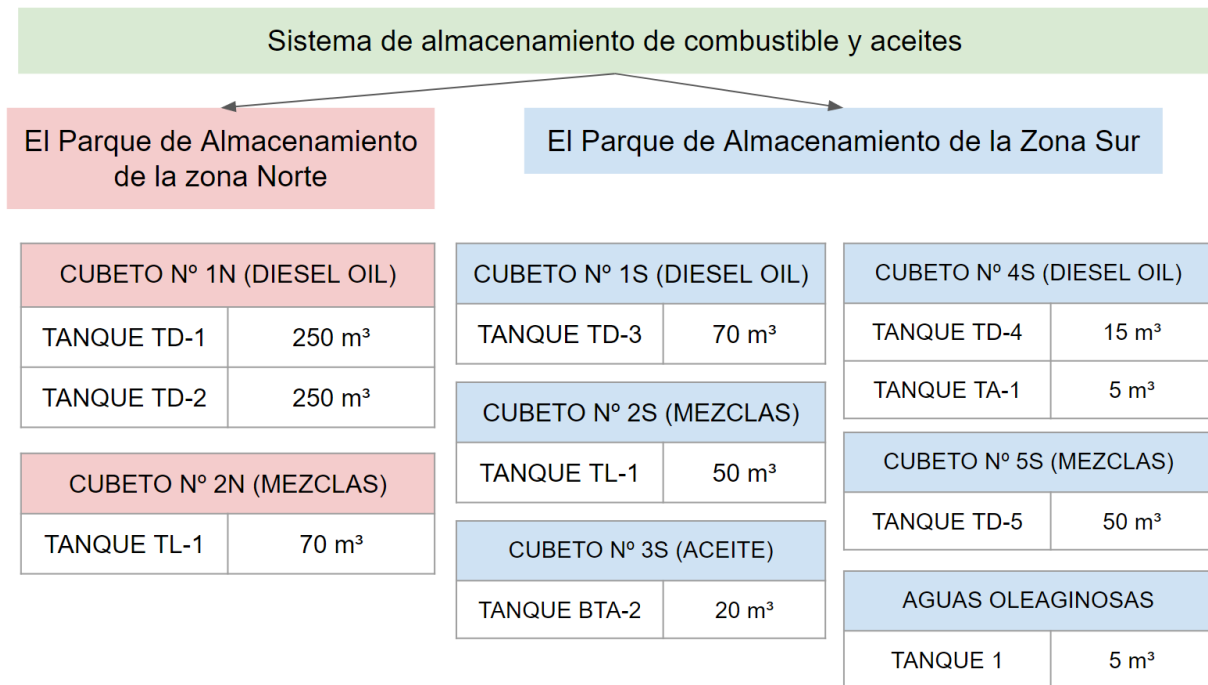


Imagen 4.2.2.2_01: Sistema de almacenamiento de combustibles y aceites

En cuanto a vocabulario específico de esta sección se puede encontrar:

Cubeto : recipiente completamente estanco. Se utiliza para el almacenamiento de productos químicos, en este caso, el combustible.

Aguas oleaginosas : Son aguas mezcladas con restos de las fugas de combustible, aceites lubricantes, vertidos de los distintos procesos de limpieza, etc.

4.3 Red de distribución de la isla de El Hierro

Haciendo un primer contacto con la estructura del Sistema Eléctrico de la isla de El Hierro, cabe indicar, que se ha extraído del plano PIS-1_EL_SISTEMA_ACTUAL realizado en septiembre del año 2007 por el Gobierno de Canarias. Su distribución es la que se muestra en la captura de la *Imagen 4.3_01*. En ella se puede apreciar, que las líneas de colores, son la red de distribución de 20 kV. La isla no posee red de transporte ni de subtransporte. Está compuesta por 129,8 km de líneas, de las cuales, 78,4 km son aéreas con apoyos al tresbolillo (59%) y 51,4 km son subterráneas (41%).

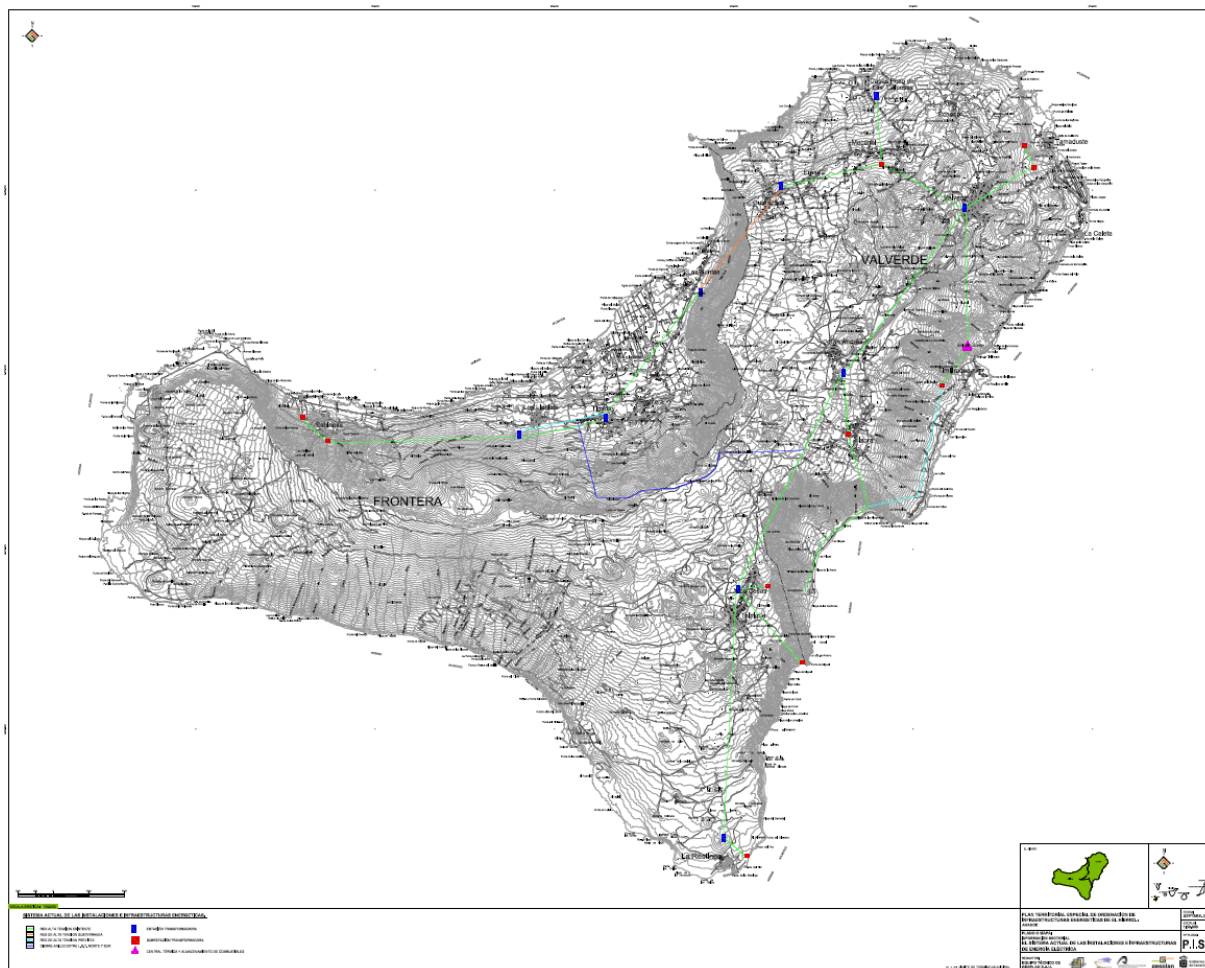


Imagen 4.3_01: PIS-1_EL_SISTEMA_ACTUAL

La designación y las características de los conductores que recorren la isla vienen determinados en la siguiente tabla:

TIPO	DENOMINACIÓN	SECCIÓN [mm ²]	T ^a 20°C R [Ω/km]	T ^a 20°C X _L [Ω/km]
Aérea	LARL 78	78,6	0,403	0,394
Subterránea	AL RH5Z1	150	0,206	0,114

Tabla 4.3_01: Designación y las características de los conductores

Esta información se ha obtenido del gobierno de Canarias dando los valores de ciertos proyectos realizados en la isla y publicados en el BOE. Por otro lado, para los eléctricos, la designación del cable LARL quizás sea extraña. Es comúnmente usada por Endesa para líneas aéreas en ambientes salinos. Esto significa que el alma de acero y los conductores de aluminio, tienen una aleación especial, resistente a la corrosión. Los temas a tratar a continuación, se han basado en los proyectos tipo de Endesa.

En el caso de la línea aérea, la resistencia ha sido proporcionada por el fabricante y la reactancia inductiva (X_L), se ha calculado según la configuración física de los apoyos ya que esta viene determinada por la distancia a la que se encuentra de los otros 2 cables de la terna. En base al diagrama de la *Imagen 4.3_02*, se han realizado los siguientes cálculos:

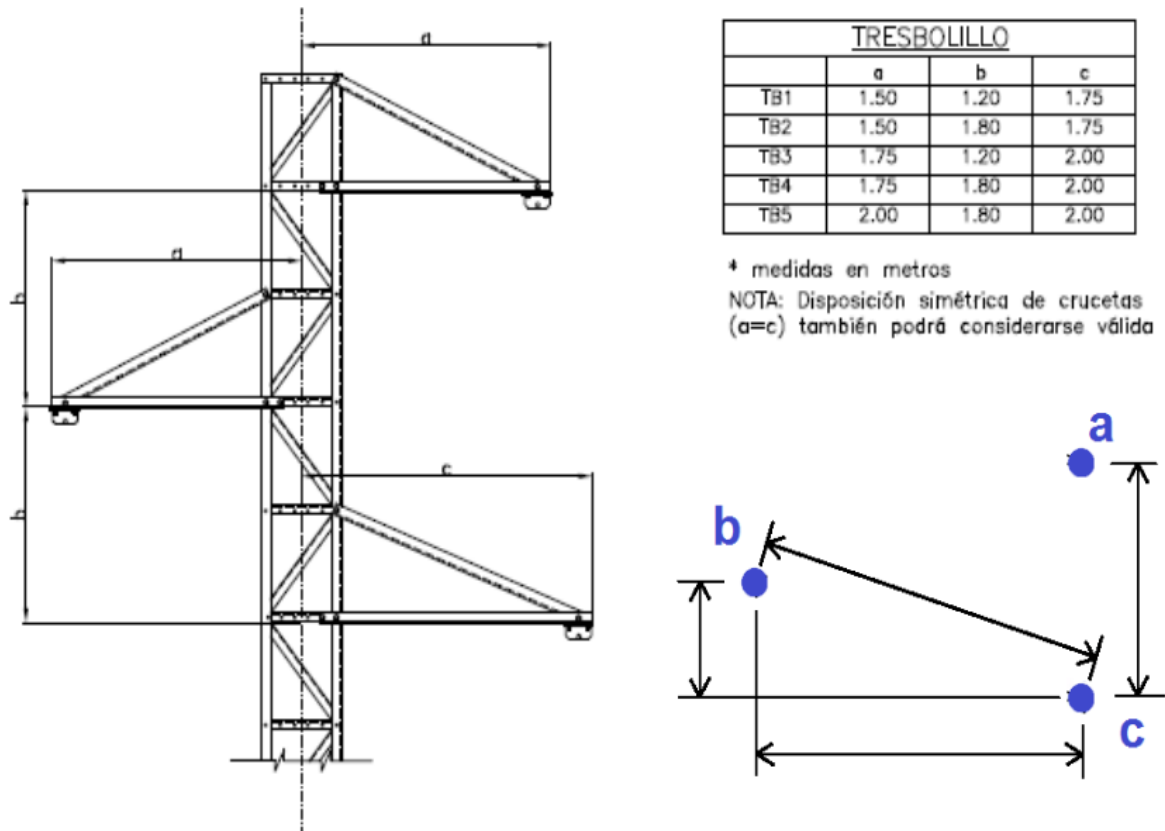


Imagen 4.3_02: Estructura del apoyo.

Inicialmente se ha usado el Teorema de Pitágoras para obtener las distancias D_{bc} , D_{ab} y D_{ac} . Seguidamente se selecciona el tipo de apoyo según la tabla de la *Imagen 4.3_02*, en este caso se ha seleccionado la TB1. Una vez seleccionados los valores a, b y c, se procede a calcular las distancias.

$$D_{bc} = \sqrt{1,2^2 + (1,5 + 1,75)^2}; D_{bc} = 3,464 \text{ m}$$

$$D_{ab} = \sqrt{3^2 + 1,2^2}; D_{ab} = 3,231 \text{ m}$$

$$3,25 - 3 = 0,25; 1,2 \cdot 2 = 2,4 \text{ m}$$

$$D_{ac} = \sqrt{2,4^2 + 0,25^2}; D_{ac} = 2,413 \text{ m}$$

Tras calcular las distancias se obtiene que el diámetro total de los 3 conductores es de 11,34 mm, por lo que su radio del haz será de 5,67 mm. A continuación, haciendo uso de las expresiones del proyecto tipo de Endesa para una línea aérea de 20 kV, se calcula la distancia equivalente y la reactancia inductiva de la línea respectivamente.

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{bc} \cdot D_{ab} \cdot D_{ac}}$$

D_{eq} → Distancia equivalente [m]
 D_{bc} → Distancia del punta b al c [m]
 D_{ab} → Distancia del punta a al b [m]
 D_{ac} → Distancia del punta a al c [m]

$$D_{eq} = \sqrt[3]{3,464 \cdot 3,231 \cdot 2,413} ; D_{eq} = 3 \text{ m}$$

$$X_L = (2 \cdot \pi \cdot f) \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{D_{eq}}{r_{haz}}\right)$$

X_L → Reactancia inductiva [Ω/km]
 f → Frecuencia de la red [Hz]
 D_{eq} → Distancia equivalente [m]
 r_{haz} → Radio del haz de cables [m]

$$X_L = (2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln\left(\frac{3}{5,67 \cdot 10^{-3}}\right) ; X_L = 0,394 \Omega/\text{km}$$

Para el valor de la reactancia capacitiva, al estar tan separados los cables unos de otros, no se ha calculado, ya que sería un valor muy pequeño y por tanto despreciable.

En el caso de la línea subterránea, el valor de la reactancia inductiva lo proporcionaba el fabricante. No obstante el valor de la reactancia capacitiva, al tratarse de una línea trifásica enterrada donde la terna están todos los conductores en contacto, si que pueden haber efectos capacitivos sobre sí misma. En primer lugar se ha obtenido la reactancia capacitiva por la siguiente expresión:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

X_C → Reactancia capacitiva [Ω/km]
 f → Frecuencia de la red [Hz]
 C → Capacidad [F]

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,254 \cdot 10^{-6}} ; X_C = 12.531,885 \Omega/\text{km}$$

Posteriormente se obtiene la impedancia de la línea en números complejos y forma rectangular empleando los valores de la *Tabla 4.3_01*.

$$Z = R \pm j X$$

R → Parte real [Ω/km]
 X → Parte compleja [Ω/km]

$$Z = 0,206 - j 12.531,885 \Omega/\text{km}$$

Para poder implementar este valor en la simulación que se realizará más adelante, también se va a proceder a obtener el valor de la susceptancia de la línea. Seguidamente se obtiene la admitancia del conductor en Siemens partido kilómetro.

$$Y = \frac{1}{Z}$$

$Y \rightarrow$ Parte real [S/km]

$Z \rightarrow$ Parte compleja [Ω /km]

$$Y = \frac{1}{0,206 - j 12.531,885} ; Y = 1,31 \cdot 10^{-9} + j 79,796 \cdot 10^{-6} \text{ S/km}$$

Como $Y = G + j B$, siendo G la Conductancia y B la Susceptancia con un orden de magnitud de pico y micro S/km, este valor también se va a despreciar a efectos de la simulación que se realizará más adelante. Así que, se da concluida la explicación de los valores de la *Tabla 4.3_01*.

4.3.1 Corredor eléctrico

En base a la memoria IV del documento Memoria de Ordenación del Cabildo de El Hierro y la ya introducida red de distribución de la isla, se tiene que tener presente el corredor eléctrico establecido en la isla. Este corredor eléctrico no es más que la red de distribución antigua de la isla en la que en este documento asienta que toda infraestructura eléctrica de nueva construcción debe transcurrir por donde marca la *Imagen 4.3.1_01*.

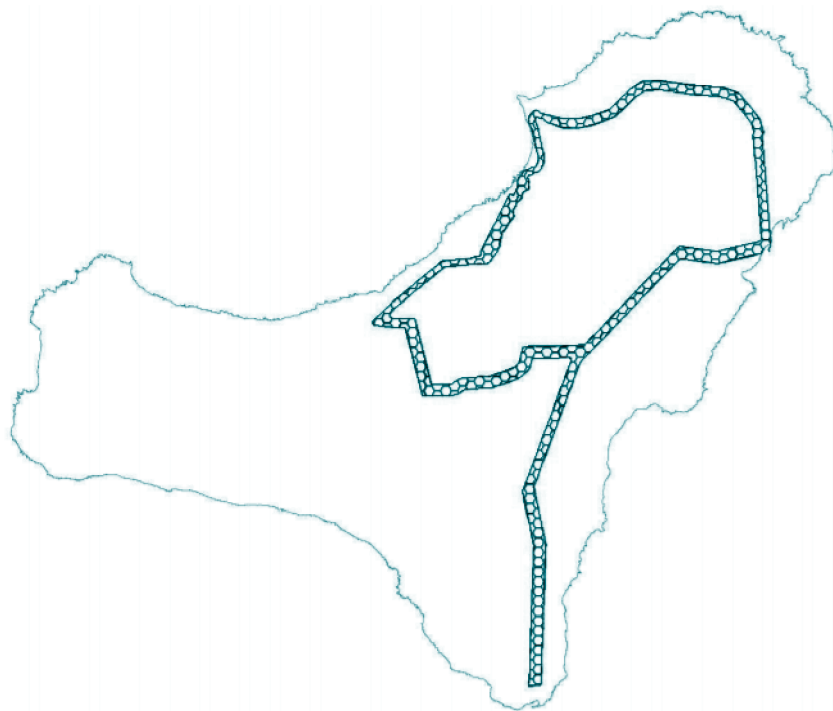


Imagen 4.3.1_01: Corredor Eléctrico Isla de El hierro Mem_OrdenaciónEH

Esto es debido a las altas exigencias autoimplementadas de la isla para no entrar en conflicto con todos los espacios naturales protegidos. Es por ello, que toda nueva instalación deberá de ir subterránea. Ésto último, generará en un futuro, una gran potencia reactiva capacitiva que deberá de ser subsanada en las subestaciones para corregir el factor de potencia de la red.

4.3.2 Longitudes de las líneas

La longitud de las líneas se han medido en el plano PIS-1_EL_SISTEMA_ACTUAL y posteriormente agrupado en esta tabla de elaboración propia.

LÍNEA	TRAMO	LONGITUD SEGÚN PIS-1_EL_SISTEMA_ACTUAL [m]
Gorona del viento – Central Térmica	Aéreo	610
Central Térmica – Timijiraque	Subterráneo	1.077
Central Térmica – Valverde	Aéreo	3.692
Timijiraque – Isora	Aéreo	6.462
Isora – San Andrés	Aéreo	1.539
San Andrés – Valverde	Aéreo	5.539
San Andrés – Tigaday	Aéreo	9.539
San Andrés – Taibique	Aéreo	6.462
Valverde – Mocanal	Subterráneo	2.462
Mocanal – Guarazoca	Aéreo	2.769
Guarazoca – Las Puntas	Subterráneo	3.692
Las Puntas – Tigaday	Aéreo	4.308
Tigaday – Los Llanitos	Aéreo	2.462

Tabla 4.3.2_01: Longitud de los tramos

Las longitudes mostradas servirán para el cálculo (en el siguiente apartado) de las características de todos los tramos en conjunto, con los valores de las resistencias de la tabla *Tabla 4.3_01*.

¿Cómo se han obtenido estos consumos?. Haciendo un poco de cálculo simbólico sobre las clásicas expresiones de potencia activa, reactiva en trifásica y el triángulo de potencias. A continuación se describen las ecuaciones empleadas:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

$P \rightarrow$ Potencia Activa [W]
 $V_L \rightarrow$ Tensión de línea [V]
 $I \rightarrow$ Corriente [A]
 $\varphi \rightarrow$ Ángulo entre V I

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \sen(\varphi)$$

$Q \rightarrow$ Potencia Reactiva [VAr]
 $V_L \rightarrow$ Tensión de línea [V]
 $I \rightarrow$ Corriente [A]
 $\varphi \rightarrow$ Ángulo entre V I

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$S \rightarrow$ Potencia Aparente [VA]
 $P \rightarrow$ Potencia Activa [W]
 $Q \rightarrow$ Potencia Reactiva [VAr]

Despejar la corriente en la primera expresión:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos(\varphi)}$$

Sustituir en la ecuación de la potencia reactiva y eliminar términos:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \cos(\varphi)} \cdot \sen(\varphi)$$

Simplificar expresión:

$$Q = P \cdot \frac{\sen(\varphi)}{\cos(\varphi)} ; \quad Q = P \cdot \tan(\varphi)$$

Por consiguiente, ya se tiene el porcentaje de la población como se muestra en la *Tabla 4.4_01* y también se tiene los consumos en base a la distribución de esa población como muestra la *Tabla 4.4_02*. Esto se ha realizado de esta forma porque en las gráficas facilitadas por la curva de demanda de Red Eléctrica de España solo proporciona el global de la isla. Al introducir esta dato en la hoja excel, automáticamente se obtienen los consumos de cada BUS.

MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	Nº DE PERSONAS POR POBLACIÓN (2019)	Nº DE PERSONAS TOTALES POR MUNICIPIO (2019)	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA
Valverde	San Andrés	216	5.005	1,97
	Isora	398		3,63
	Las Playas	104		0,95
	Timijiraque	196		1,79
	Valverde	1.639		14,94
	Tamaduste	319		2,91
	Mocanal	939		8,56
	Guarazoca	324		2,95
	Resto municipio	870		7,93
Frontera	Las Puntas	299	4.093	2,73
	Tigaday	1.308		11,93
	Los Llanillos	291		2,65
	Sabinosa	233		2,12
	Resto municipio	1.962		17,89
El Pinar	Taibique	827	1.870	7,54
	Resto municipio	1.043		9,51
TOTALES		10.968	10.968	100,00

Tabla 4.4_01: Porcentaje de la población sobre toda la isla

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	FP = $\cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]
Valverde	San Andrés	1,97	0,160	0,077
	Isora	3,63	0,294	0,142
	Las Playas	0,95	0,077	0,037
	Timijiraque	1,79	0,145	0,070
	Valverde	14,94	1,210	0,586
	Tamaduste	2,91	0,236	0,114
	Mocanal	8,56	0,693	0,336
	Guarazoca	2,95	0,239	0,116
	Resto municipio	7,93	0,643	0,311
Frontera	Las Puntas	2,73	0,221	0,107
	Tigaday	11,93	0,966	0,468
	Los Llanillos	2,65	0,215	0,104
	Sabinosa	2,12	0,172	0,083
	Resto municipio	17,89	1,449	0,702
El Pinar	Taibique	7,54	0,611	0,296
	Resto municipio	9,51	0,770	0,373
TOTALES		100,00	8,100	3,923
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]		8,100	20-8-19 21:27
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]		9,000	

Tabla 4.4_02: Estimación de potencia activa y reactiva

El motivo de obtener todos los parámetros de la parte de generación, distribución y consumo (que es lo que se ha adquirido en este punto 4) es el de poder simular la red de la isla, en un programa informático capaz de proporcionar datos esclarecedores sobre el comportamiento de la red y así poder dar respuesta al objeto de estudio del presente TFG. El programa que se va a usar es el Power World con una licencia educacional.

Al tratarse de una licencia de estudiante, la simulación solo permite 13 BUSES, por lo que para poder llevar a cabo la simulación se han realizado las siguientes consideraciones:

- Como no se pueden simular todos los BUSES ya que estos están limitados por el programa de simulación, los buses con cargas más pequeñas y con poca relevancia, se colocaran como cargas directas a sus BUSES principales.
- Los BUSES de: Las Playas, Tamaduste, Pozo de las Calcosas y Sabinosa se consideran como cargas directas a su BUS respectivo.
- Se desconoce si existe alguno de los tramos presentes como línea subterránea. Los tramos subterráneos que se han tenido en cuenta son los obtenidos de las publicaciones del gobierno de canarias y del boletín oficial de canarias.
- Existe una pequeña proporción del consumo de cada municipio que se localiza de forma dispersa por el territorio. Por esta razón, se han determinado 3 cargas a nombre de "Resto del municipio". Estas están situadas en su BUS más cercano. Ejemplo: En el BUS de Taibique aparece la carga del mismo pueblo más la carga del resto del municipio que engloba Las Casas, Punta de Miguel y la Restinga.
- La carga del BUS Pozo de las Calcosas, al tratarse un pueblo con pocos habitantes y ser segunda residencia de los habitantes de Mocanal (solo en verano se llena el pueblo, el resto del año esta casi vacío), no se considera carga directa en el BUS de Mocanal, sino que se ha incluido en la carga de "Resto del municipio de Valverde".

Con las siguientes consideraciones aclaradas, se podrá diseñar una red que se aproxime a la real, presente en la isla. Por esta razón se ha elaborado la red de distribución que se pretende simular en el Power World. Ésta se presenta en la *Imagen 4.4_01*. Los colores presentes en la isla indican el municipio: Verde para Frontera, rojo para El Pinar y amarillo para Valverde. Los puntos azules representan los BUSES a estudiar. Finalmente las líneas verdes y naranjas son las redes de distribución aéreas y subterráneas respectivamente.

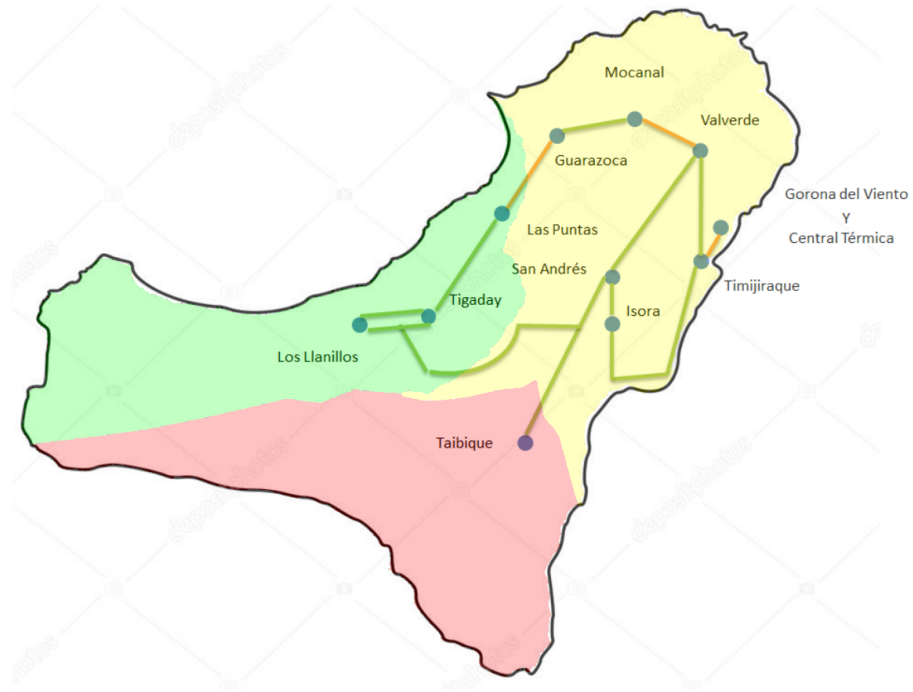


Imagen 4.4_01: Red de distribución a simular

Estas consideraciones que se han tomado no son tan desorbitadas si se compara con el plano PIS-2_DEMANDA_ENERGETICA donde determina los focos de consumo de energía de la isla.

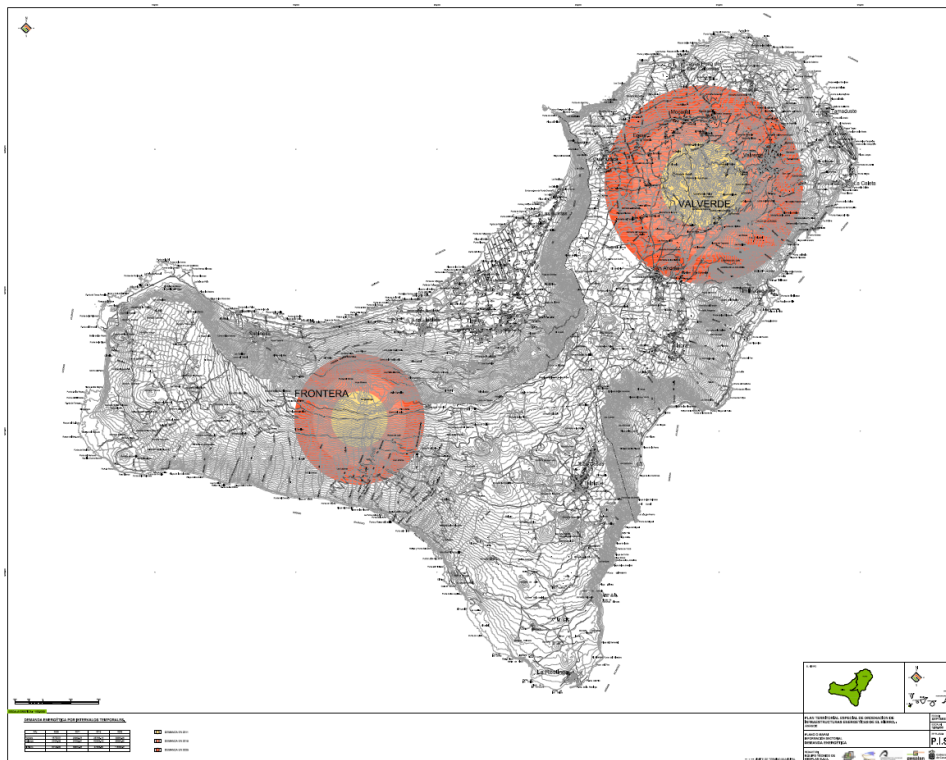


Imagen 4.4_02: PIS-2_DEMANDA_ENERGETICA

Capítulo 5

5 Generalidades previas al modelado del SEP

En este capítulo se acaban de obtener los parámetros necesarios para implementar las características de todos los tramos del sistema eléctrico de potencia de la isla, para ser implementados en el programa de simulación.

Tiempo de lectura 5 min aprox

5.1 Sistema por unidad

El sistema por unidad no es más que una forma de normalizar valores de variables eléctricas para cuantificar una magnitud. Esto se hace para facilitar los cálculos ya que simplifica el sistema y proporciona una idea exacta de su valor. Este sistema se utiliza, como por ejemplo, cuando aparecen distintos niveles de tensión, es por ello que al pasarlo a valores por unidad, ofrece una idea exacta de los valores de tensión según sectores.

Como para poder implementar los parámetros eléctricos del SEP de la isla en el programa se tiene que hacer uso de este sistema por unidad, a continuación se van a describir los pasos realizados.

5.1.1 Valores base

Para hacer uso del Sistema por unidad hace falta lo que se conoce como valores base. Los valores base, son una variables eléctricas sobre las cuales se van a referenciar todas las demás del SEP. En este caso los valores determinados son los que aparecen en la tabla *Tabla 5.1.1_01*. Estos valores se han determinado con la tensión de distribución y la máxima potencia aparente consumida puntualmente en la isla para el 2019. El valor de la impedancia base se ha obtenido con su expresión que se muestra a continuación:

Impedancias Base:

Conocidos los valores de la potencia base y de las tensiones en cada nivel, la impedancia se calcula según la expresión:

$$Z_B = \frac{V_B^{l-l^2} (kV)}{S_B (MVA)}$$

TENSIÓN BASE	V B	20	kV
POTENCIA APARENTE BASE	S B	8,1	MVA
IMPEDANCIA BASE	Z B	49	Ω

Tabla 5.1.1_01: Valores base

5.1.2 Valores por unidad

Los valores por unidad en un sistema eléctrico vienen definidos por la siguiente expresión:

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{Real}}{Valor_{Base}}$$

Estos valores se caracterizan por:

- Permitir una comparación directa de los valores del sistema
- Los valores de las impedancias de las líneas, tienen un rango de valores mucho más reducido que en valores óhmicos, lo que permite su estimación sin incorporar grandes errores
- Las variables se pueden expresar tanto en valores complejos como en valores eficaces.

5.1.2.1 Impedancias de línea

Para obtener los valores de impedancia de cada línea en valores por unidad, se a empleado la siguiente expresión:

$$\bar{Z}_{pu} = \frac{\bar{Z} (\Omega)}{Z_B (\Omega)}$$

Con ella se ha obtenido la *Tabla 5.1.2.1_01* de elaboración propia de las impedancias de línea por unidad de cada tramo de la isla.

LÍNEA	TRAMO	IMPEDANCIA DE LA LÍNEA ZL [Ω]	IMPEDANCIA DE LA LÍNEA ZL p.u
Gorona del viento – Central Térmica	Aéreo	0,24583+0,24034i	0,0049780575+0,004866885i
Central Térmica – Timijiraque	Subterráneo	0,221862+0,122778i	0,0044927055+0,0024862545i
Central Térmica – Valverde	Aéreo	1,487876+1,454648i	0,030129489+0,029456622i
Timijiraque – Isora	Aéreo	2,604186+2,546028i	0,0527347665+0,051557067i
Isora – San Andrés	Aéreo	0,620217+0,606366i	0,01255939425+0,0122789115i
San Andrés – Valverde	Aéreo	2,232217+2,182366i	0,04520239425+0,0441929115i
San Andrés – Tigaday	Aéreo	3,844217+3,758366i	0,07784539425+0,0761069115i
San Andrés – Taibique	Aéreo	2,604186+2,546028i	0,0527347665+0,051557067i
Valverde – Mocanal	Subterráneo	0,507172+0,280668i	0,010270233+0,005683527i
Mocanal – Guarazoca	Aéreo	1,115907+1,090986i	0,02259711675+0,0220924665i
Guarazoca – Las Puntas	Subterráneo	0,760552+0,420888i	0,015401178+0,008522982i
Las Puntas – Tigaday	Aéreo	1,736124+1,697352i	0,035156511+0,034371378i
Tigaday – Los Llanillos	Aéreo	0,992186+0,970028i	0,0200917665+0,019643067i

Tabla 5.1.2.1_01: Impedancias de línea por unidad

Capítulo 6

6 Diseño de la simulación

En este capítulo se explica como se ha diseñado el Sistema Eléctrico de Potencia de la isla en base a una forma de trabajar y siguiendo unos pasos. Tras finalizar este apartado, ya se podrá simular la red.

Tiempo de lectura 10 min aprox

6.1 Introducción al Power World

El software que se va a emplear para el análisis y simulación de los flujos de potencia del SEP de la isla de El Hierro es el Power World. El programa está estructurado en una serie de módulos interrelacionados entre sí a través del módulo principal de cálculo de flujo de cargas. Todos los módulos comparten la misma interfaz gráfica para el análisis de resultados.

El campo de aplicación del Power World es de los estudios en régimen permanente haciendo uso del método Newton-Raphson, permitiendo hacer análisis técnicos (flujo óptimo de cargas, relación de voltaje y corriente en una línea de transmisión, fallas simétricas y asimétricas, operación económica, análisis de contingencia y otros). Con él, se van a obtener información como el sentido de los flujos de potencia, las pérdidas de energía debido al transporte y comprender como se comporta la red, entre otros aspectos.

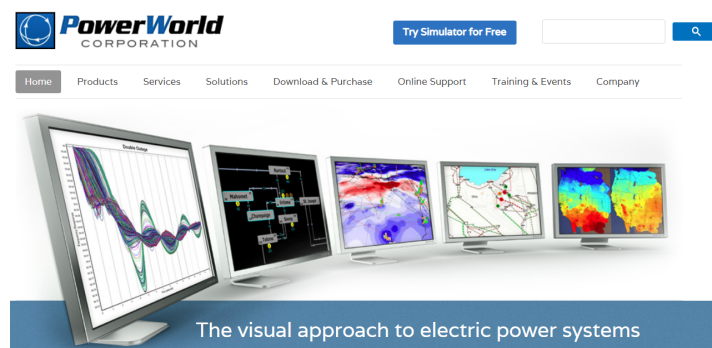


Imagen 6.1_01: Web del programa Power World

6.2 Configuraciones previas

Tras descargar la versión educacional de la web, se tiene que hacer una serie de configuraciones previas al programa antes de empezar a modelar la red de la isla. Como se muestra en las imágenes siguientes de elaboración propia, se tiene que modificar los parámetros relacionados con la venta de “default drawings values for new objects”.

Edit Mode → Draw → Default Drawing Options → Display Bus

- Pos 1 → Bus Voltage (P.U)
- ↳ Pos 2 → Bus Angle (Degrees)

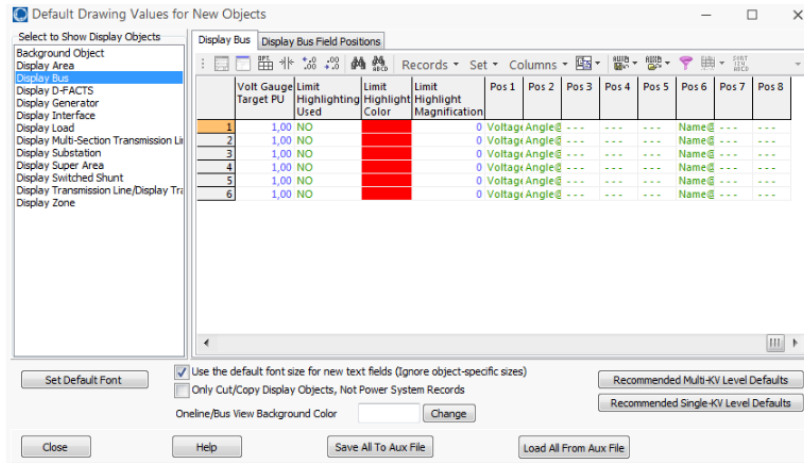


Imagen 6.2_01: Default drawings values for new objects 1

Edit Mode → Draw → Default Drawing Options → Display → → Transmission Line

- Pos 1 → MW Flow
- ↳ Pos 2 → MVar Flow
- ↳ Pos 9 → MW Flow
- ↳ Pos 10 → MVar Flow

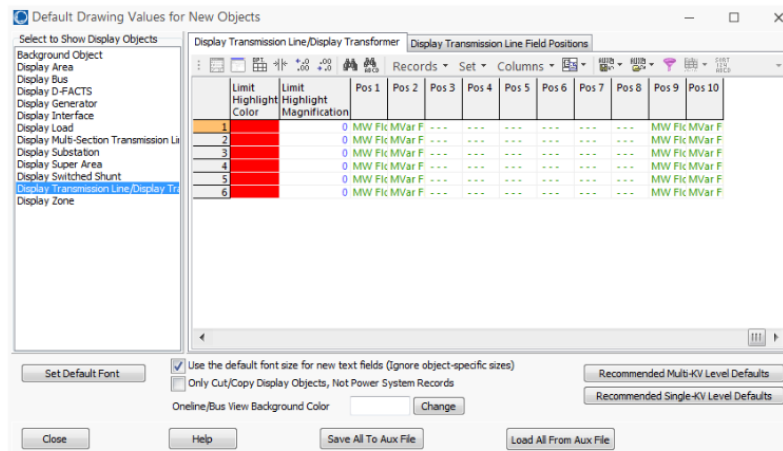


Imagen 6.2_02: Default drawings values for new objects 2

Finalmente es siempre interesante añadir la red de fondo en el espacio de trabajo para insertar los elementos de una forma ordenada y recta para que tenga buena presencia. Esto se configura desde el siguiente menú:

Edit Mode → Options → Draw Grid → Draw Grid Lines

6.3 Pasos y guía de diseño

Simplemente indicar que los pasos seguidos para el diseño es ser ordenado y cumplir siempre el siguiente orden a la hora de insertar los elementos y sus valores. Se debe respetar la inserción en primer lugar de los BUSES, en segundo lugar las LÍNEAS, en tercer lugar las CARGAS y finalmente los GENERADORES. Paralelamente a esta guía de diseño, resaltar que el generador SLACK se ha configurado para la central Térmica de Llanos Blancos.

6.3.1 Buses

Los menús a los que se a accedido para la configuración de los BUSES son los que se presentan a continuación:

File → New Case

Edit Mode → Draw → Network → Bus → Nominal Voltage = 20 kV
 Edit Mode → Draw → Background → Text
 Edit Mode → Draw → Select Region
 Edit Mode → Draw → Format

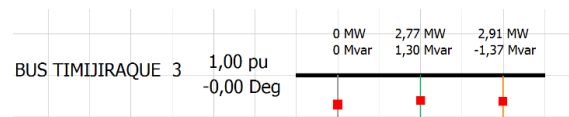


Imagen 6.3.1_01: Configuración de los BUSES

6.3.2 Líneas

Los menús a los que se a accedido para la configuración de las LÍNEAS son los que se presentan seguidamente:

Edit Mode → Draw → Network → Transmission Line (dibujar + enter)



Imagen 6.3.2_01: Configuración de LÍNEAS

6.3.3 Cargas

Los menús a los que se a accedido para la configuración de las CARGAS son los que se presentan abajo:

Edit Mode → Draw → Network → Load → Seleccionar orientación
 → Introducir potencia activa real
 → Introducir potencia reactiva real

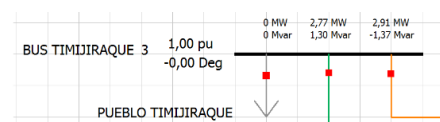


Imagen 6.3.3_01: Configuración de las CARGAS

6.3.4 Generadores

Los menús a los que se a accedido para la configuración de los GENERADORES son los que se presentan a continuación:

Edit Mode → Draw → Network → Generator → Display Information Up

Power and Voltage Control → MW Set Point Slack → Generator MVA Base 8,1 (Valor arbitrario)

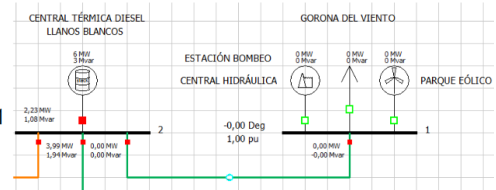


Imagen 6.3.4_01: Configuración de los GENERADORES

6.4 Modelado final

Tras colocar todos los componentes, enlazarlos e introducir todos sus valores el modelado de la red de la isla queda con el siguiente aspecto:

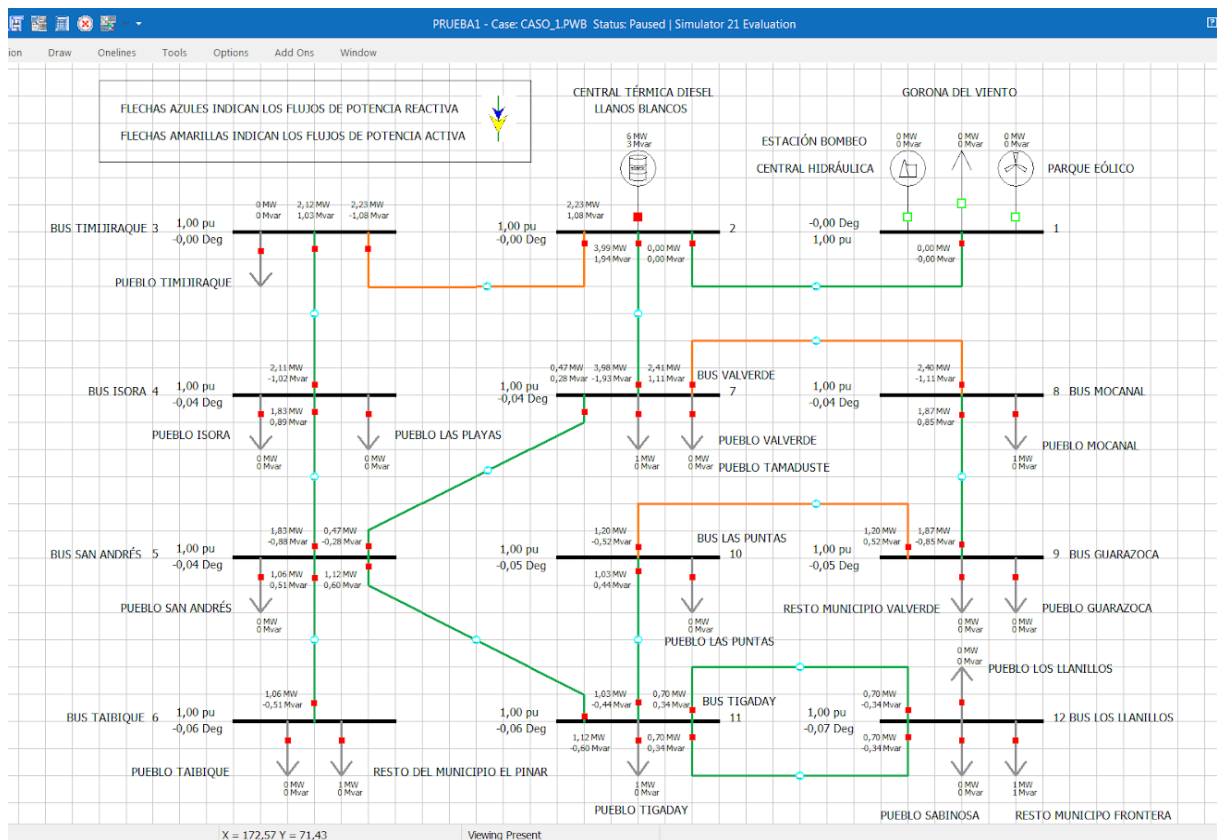


Imagen 6.4_01: Modelo del SEP de la isla

Capítulo 7

7 Casos de estudio del SEP de la isla de El Hierro

En este capítulo se han llevado a cabo todas simulaciones de los casos y situaciones que se proponen. Estas simulación proyectan unos resultado descritos en el apartado de conclusiones globales.

Tiempo de lectura 35 min aprox

7.1 Criterios previos

La simulación del SEP permitirá extraer la información indicada en el apartado 6.1, pero para ello se tiene que simular una serie de escenarios que proporcionen esa información. Para ello se han determinado los criterios siguientes para decidir esos escenarios:

- Para observar como se comporta el sistema eléctrico de potencia de la isla, se ha elegido los casos o días más relevantes del 2019 que puedan aportar información significativa. Estos servirán y ayudarán para poder obtener los flujos de potencia, las pérdidas de las líneas y en definitiva abrir camino para la determinación de las características eléctricas de la propuesta solución para la descarbonización del SEP.
- Los consumos que se toman son en un instante determinado de tiempo, por ello su unidad será (MW).
- El consumo de bombeo se considera a parte del consumo de la Isla para poder visualizar mejor los consumos por separado.
- Se ha decidido que sean 9 casos, por que con ellos es suficiente para representar las condiciones más representativas que aportan información sobre todo el año de estudio del 2019.

- En los siguientes casos seleccionados, las potencias y consumos instantáneos tendrán valores bajos, medios y altos, con el fin de representar situaciones diarias.
- Se estudiará los casos individuales procedentes de diferentes tipos de fuentes de energía.
- Al analizar los casos mes por mes, se seleccionarán los días en los que predomine ese caso. Es decir, habrá días en los que ocurra uno o varios casos, pero al no ser predominantes en el tiempo no se seleccionará. Solo se seleccionarán los casos que más predominan en todo un día.
- Hay casos en los que solo se dan en condiciones muy puntuales y muy pocas veces al año, por lo tanto, a pesar de que sólo ocurren en instantes de tiempo cortos, éstos se tienen que tener en cuenta.
- Los casos que no se han tenido en cuenta se considera que no son significativos debido a que están englobados en otros casos.
- Las redes de distribución de media tensión aunque estén configuradas de forma mallada, muchas veces funcionan en red radial. Por esta razón los 9 casos de estudio a considerar se simularán en ambas configuraciones. En condiciones normales se analizan los 9 casos en red mallada y en condiciones excepcionales se analizan los casos de estudio 1, 4 y 7 en red radial. Éstos últimos son los más importantes para su configuración.

7.2 Casos de estudio en red mallada

Para los casos de estudio de la red mallada, se han resaltado los casos en 3 colores según su fuente de energía: naranja para solo diesel oil, verde para completamente de origen renovable y azul para un mix procedente de diesel oil y renovables. Esto se ve reflejado en la *Tabla 7.2_01*.

Como la generación sólo puede provenir de eólica, hidráulica y diesel, cada origen tiene una columna. Los casos están diseñados con una fuente de generación o un mix de varias fuentes. Los consumos aparecen en todos los casos y el bombeo (que es el símil de almacenar energía), solo aparece en 2 casos. Indicar que los valores de la *Tabla 7.2_01* se han extraído del análisis minucioso de todos los días del año 2019 de la curva de demanda proporcionada por Red Eléctrica Española en su web.

Nº DE CASO	GENERACIÓN			CONSUMO	
	EÓLICA	HIDRÁULICA	DIESEL	CONSUMO	BOMBEO
1			100 % 6,2 MW	30 MAY 2019 12:30 6,2 MW	
2		100 % 5,5MW		27 MAY 2019 22:00 5,5 MW	
3	100 % 4,6 MW			20 ABR 2019 09:00 4,6 MW	
4	15,94 % 1,1 MW	84,06 % 5,8 MW		23 AGO 2019 12:20 6,9 MW	
5	100 % 10,8 MW			4 OCT 2019 22:20 5,9 MW	4,9 MW
6	50 % 3,5 MW		50 % 3,5 MW	3 JUN 2019 10:20 5,8 MW	1,2 MW
7	26,92 % 1,4 MW	21,15 % 1,1 MW	51,92 % 2,7 MW	5 FEB 2019 10:10 5,2MW	
8	32,31 % 2,1 MW		67,69 % 4,4 MW	18 OCT 2019 22:20 6,5 MW	
9		27,42 % 1,7 MW	72,58 % 4,5 MW	17 DIC 2019 20:20 6,2 MW	

Tabla 7.2_01: Casos de estudio Red Mallada

7.2.1 Red mallada de la isla

El motivo de que se analizen los 9 casos en red mallada es por que su uso se suele emplear en esta configuración por lo que la red queda con la siguiente configuración.

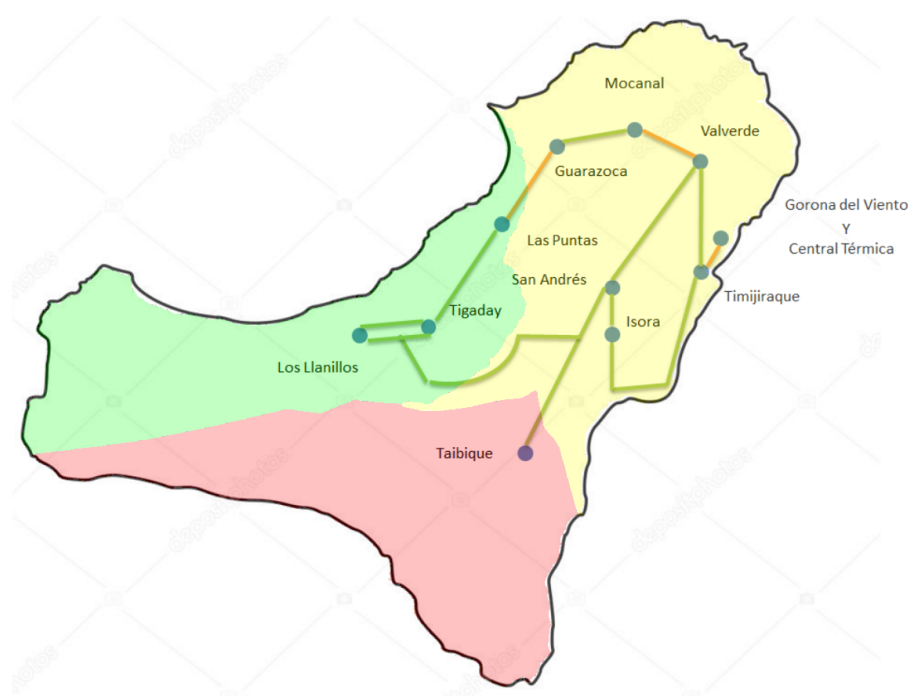


Imagen 7.2.1_01: Red de distribución (Mallada)

7.2.1.1 Caso nº1 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:

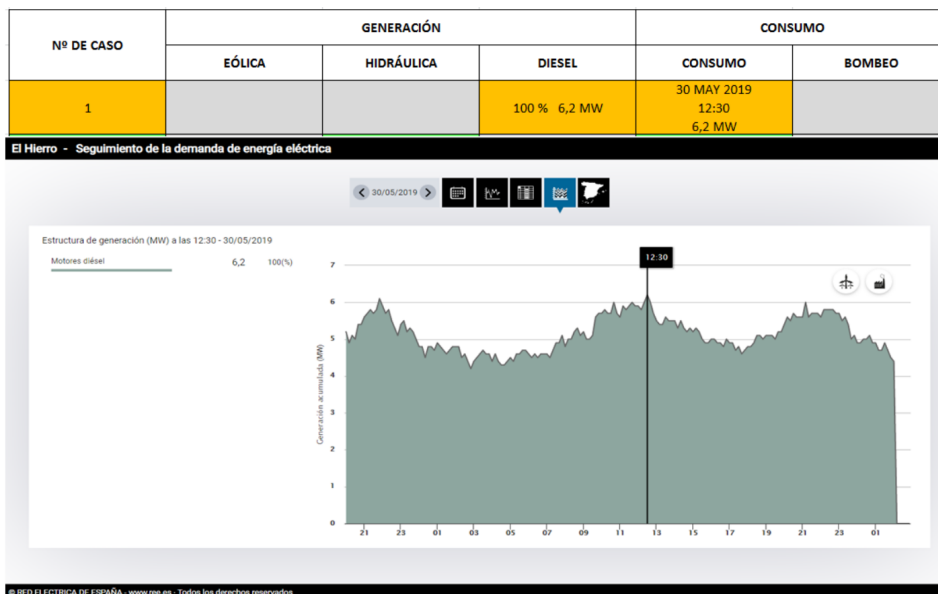


Imagen 7.2.1.1_01: Caso nº1 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.1_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	$FP = \cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVA]
Valverde	San Andrés	1,97	0,122	0,059
	Isora	3,63	0,225	0,109
	Las Playas	0,95	0,059	0,028
	Timijiraque	1,79	0,111	0,054
	Valverde	14,94	0,926	0,449
	Tamaduste	2,91	0,180	0,087
	Mocanal	8,56	0,531	0,257
	Resto municipio	2,95	0,183	0,089
Frontera	Resto municipio	7,93	0,492	0,238
	Las Puntas	2,73	0,169	0,082
	Tigaday	11,93	0,739	0,358
	Los Llanillos	2,65	0,164	0,080
	Sabinosa	2,12	0,132	0,064
El Pinar	Resto municipio	17,89	1,109	0,537
	Taibique	7,54	0,467	0,226
	Resto municipio	9,51	0,590	0,286
TOTALES		100,00	6,200	3,003
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]	6,200	30-5-19 12:30	
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]	6,889		

Tabla 7.2.1.1_01: Consumos Caso nº1 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.2.1.1_03.

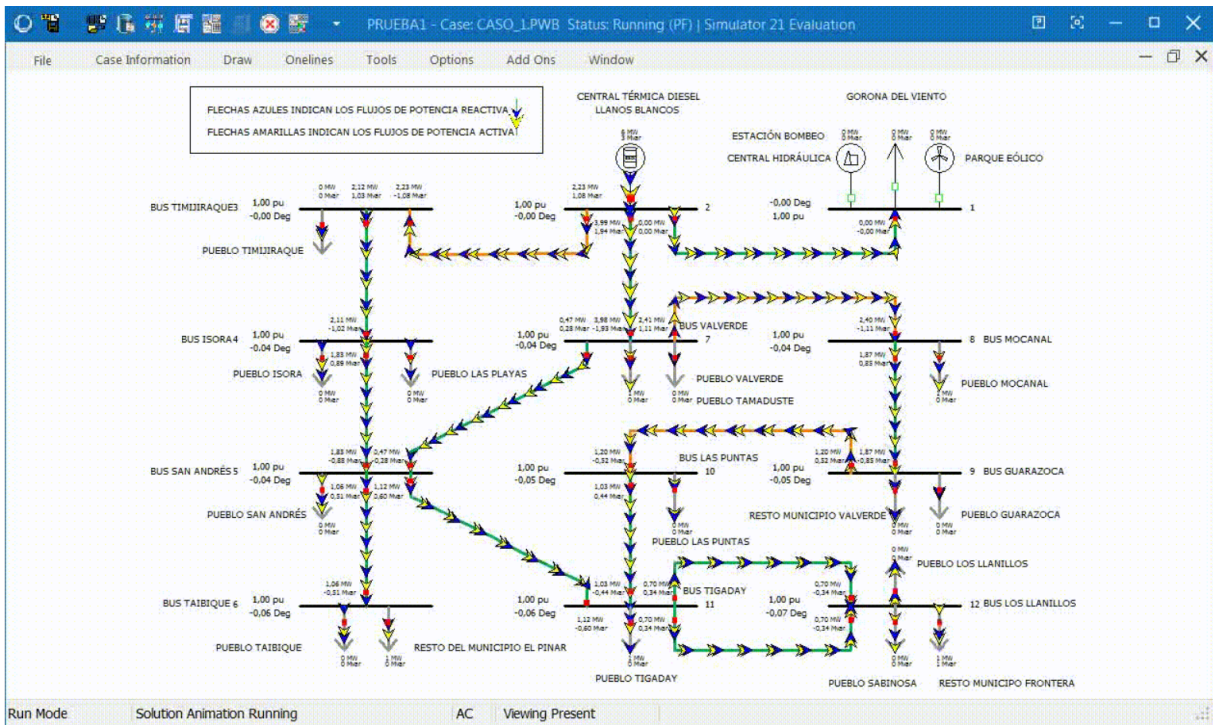


Imagen 7.2.1.1_02: Caso nº1 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	11	1	1	Closed	Line	NO	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2	2	3	1	1	Closed	Line	NO	2,227080	1,079524	2,474926	0,000000	0,000000	0,000275	0,000152
3	2	7	1	1	Closed	Line	NO	3,987595	1,935338	4,432432	0,000000	0,000000	0,005919	0,005787
4	3	4	1	1	Closed	Line	NO	2,115694	1,025317	2,351050	0,000000	0,000000	0,002916	0,002651
5	4	5	1	1	Closed	Line	NO	1,828636	0,885465	2,031738	0,000000	0,000000	0,000520	0,000509
6	5	6	1	1	Closed	Line	NO	1,057889	0,512357	1,175432	0,000000	0,000000	0,000732	0,000715
7	7	5	1	1	Closed	Line	NO	0,469929	0,284921	0,549557	0,000000	0,000000	0,000137	0,000134
8	5	5	1	1	Closed	Line	NO	1,117971	0,598398	1,260046	0,000000	0,000000	0,001257	0,001229
9	7	8	1	1	Closed	Line	NO	2,405185	1,108638	2,648394	0,000000	0,000000	0,000723	0,000400
10	8	9	1	1	Closed	Line	NO	1,873251	0,851276	2,057605	0,000000	0,000000	0,000961	0,000939
11	9	10	1	1	Closed	Line	NO	1,197143	0,523510	1,306604	0,000000	0,000000	0,000264	0,000146
12	10	10	1	1	Closed	Line	NO	1,027855	0,441415	1,118630	0,000000	0,000000	0,000443	0,000433
13	11	11	1	2	Closed	Line	NO	0,702569	0,340249	0,788623	0,000000	0,000000	0,000123	0,000121
14	11	11	1	3	Closed	Line	NO	0,702569	0,340249	0,788623	0,000000	0,000000	0,000123	0,000121

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kv	PV Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area Nur
1	1	1	20,000000	1,000000	20,000000	-0,003533	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
2	2	1	20,000000	1,000000	20,000000	-0,003533	0,111000	0,054000	0,000000	0,000000	6,214675	3,014862	0,000000	0,000000
3	3	1	20,000000	0,999873	19,997462	-0,03926	0,204000	0,137000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
4	4	1	20,000000	0,998229	19,964574	-0,05504	0,284000	0,170000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
5	5	1	20,000000	0,997890	19,957795	-0,042022	0,122000	0,059000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
6	6	1	20,000000	0,997066	19,941320	-0,057871	1,057000	0,512000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
7	7	1	20,000000	0,998229	19,964573	-0,037485	1,106000	0,536000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
8	8	1	20,000000	0,997918	19,958362	-0,038799	0,531000	0,257000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
9	9	1	20,000000	0,997005	19,946109	-0,051550	0,875000	0,327000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
10	10	1	20,000000	0,997076	19,941517	-0,052783	0,169000	0,082000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
11	11	1	20,000000	0,996561	19,931226	-0,064206	0,739000	0,358000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
12	12	1	20,000000	0,996353	19,927052	-0,068225	1,405000	0,681000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Imagen 7.2.1.1_03: Caso nº1 M datos obtenidos

7.2.1.2 Caso nº2 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.2.1.2_01: Caso nº2 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.2_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	FP = $\cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVAr]
Valverde	San Andrés	1,97	0,108	0,052
	Isora	3,63	0,200	0,097
	Las Playas	0,95	0,052	0,025
	Timijiraque	1,79	0,098	0,048
	Valverde	14,94	0,822	0,398
	Tamaduste	2,91	0,160	0,077
	Mocanal	8,56	0,471	0,228
	Guarazoca	2,95	0,162	0,079
	Resto municipio	7,93	0,436	0,211
Frontera	Las Puntas	2,73	0,150	0,073
	Tigaday	11,93	0,656	0,318
	Los Llanillos	2,65	0,146	0,071
	Sabinosa	2,12	0,117	0,057
	Resto municipio	17,89	0,984	0,477
El Pinar	Taibique	7,54	0,415	0,201
	Resto municipio	9,51	0,523	0,253
TOTALES		100,00	5,500	2,664
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]	5,500	27-5-19 22:00	
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]	6,111		

Tabla 7.2.1.2_01: Consumos Caso nº2 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.2.1.2_03.

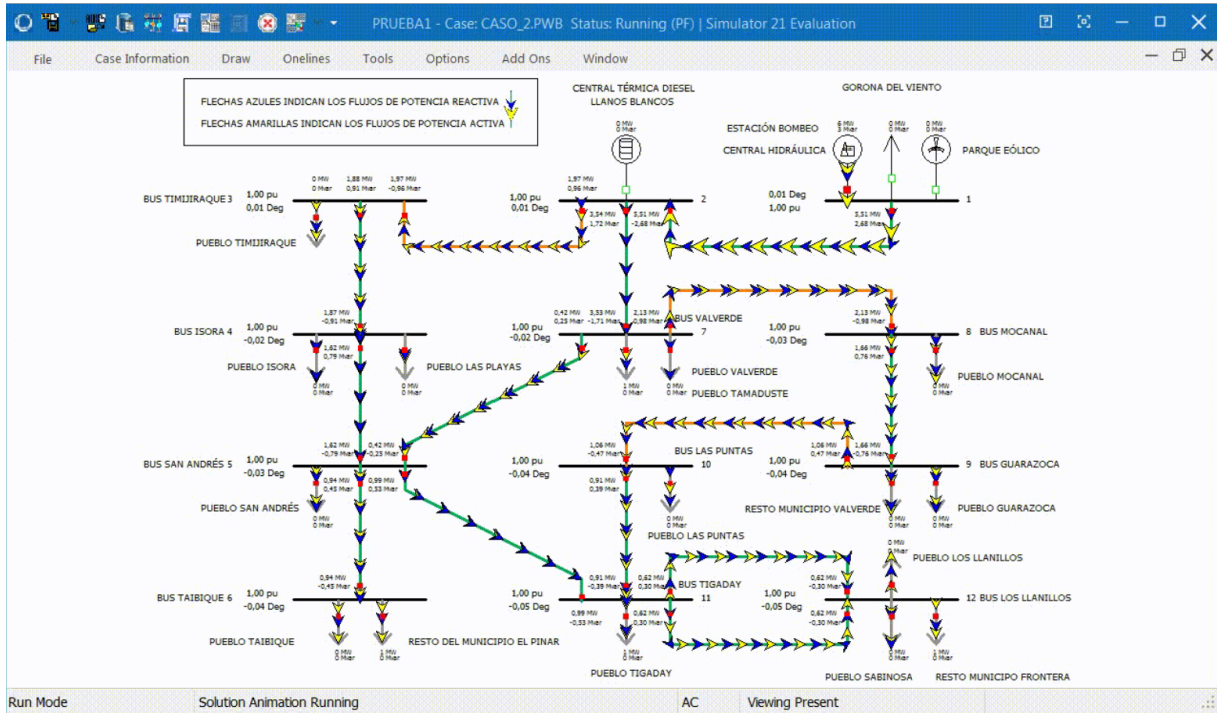


Imagen 7.2.1.2_02: Caso nº2 M simulación

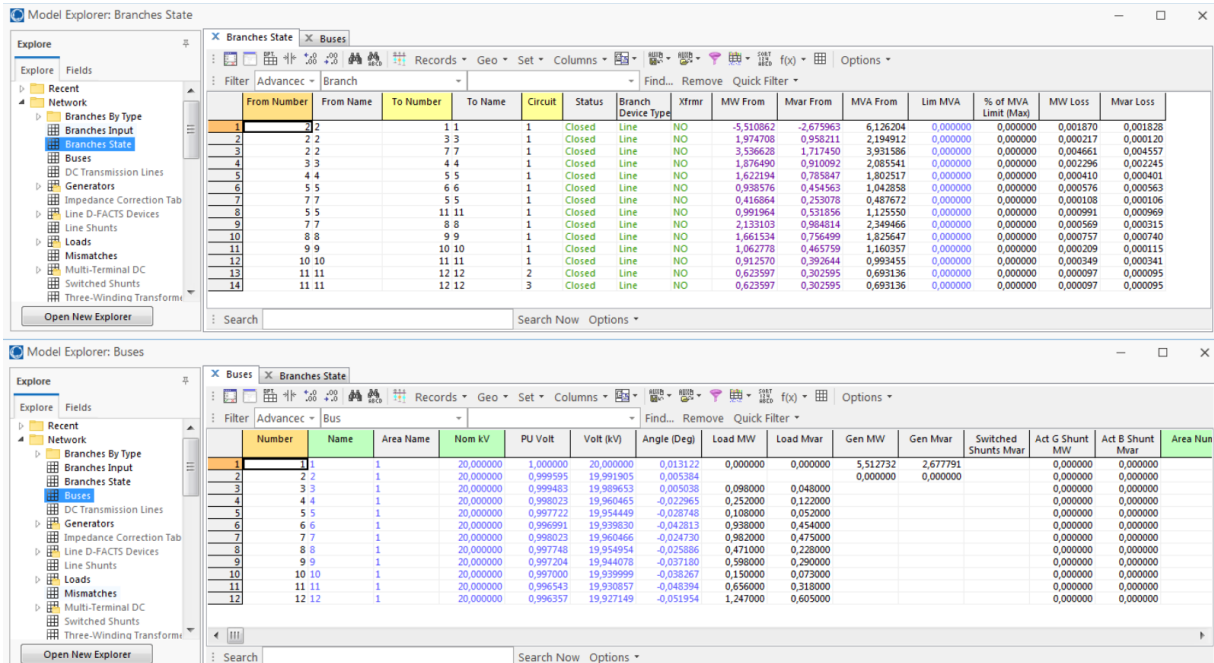


Imagen 7.2.1.2_03: Caso nº2 M datos obtenidos

7.2.1.3 Caso nº3 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.2.1.3_01: Caso nº3 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.3_01*, se introducen en el archivo del Power World.

MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]
Valverde	San Andrés	1,97	0,091	0,044
	Isora	3,63	0,167	0,081
	Las Playas	0,95	0,044	0,021
	Timijiraque	1,79	0,082	0,040
	Valverde	14,94	0,687	0,333
	Tamaduste	2,91	0,134	0,065
	Mocanal	8,56	0,394	0,191
	Guarazoca	2,95	0,136	0,066
Frontera	Resto municipio	7,93	0,365	0,177
	Las Puntas	2,73	0,125	0,061
	Tigaday	11,93	0,549	0,266
	Los Llanillos	2,65	0,122	0,059
El Pinar	Sabinosa	2,12	0,098	0,047
	Resto municipio	17,89	0,823	0,399
	Talbique	7,54	0,347	0,168
Resto municipio		9,51	0,437	0,212
TOTALES		100,00	4,600	2,228
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]		4,600	20-4-19 9:00
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]		5,111	

Tabla 7.2.1.3_01: Consumos Caso nº3 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la *Imagen 7.2.1.3_03*.

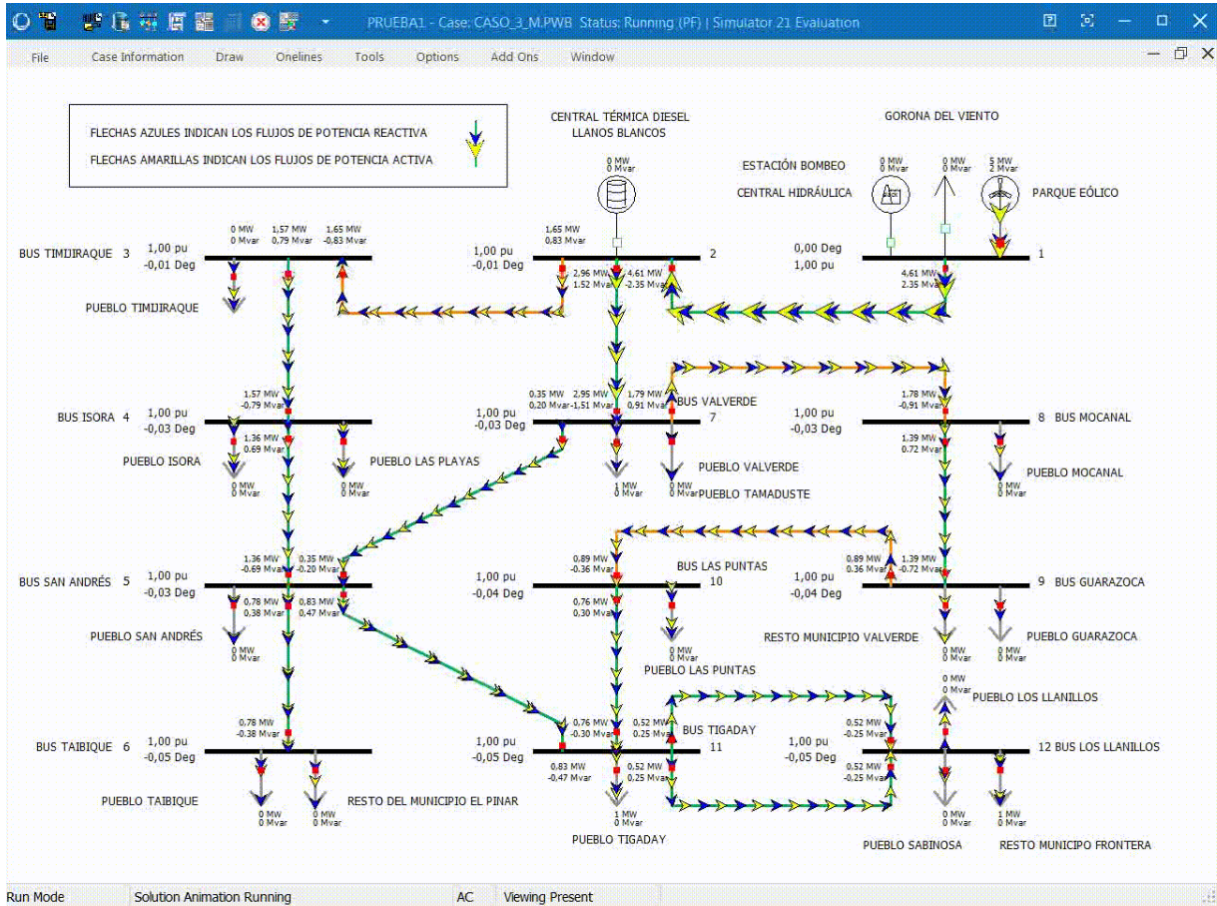


Imagen 7.2.1.3_02: Caso n°3 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xtrimr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	1	11	11	1	Closed	Line	NO	-4,6	-2,3	5,2	0,0	0,0	0,001333	0,001303
2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	1,7	0,8	1,8	0,0	0,0	0,000154	0,000085
3	2	7	7	1	Closed	Line	NO	3,0	1,5	3,3	0,0	0,0	0,003331	0,003257
4	3	3	4	1	Closed	Line	NO	1,6	0,8	1,8	0,0	0,0	0,003531	0,003594
5	4	5	5	1	Closed	Line	NO	1,4	0,7	1,5	0,0	0,0	0,000292	0,000285
6	5	5	6	1	Closed	Line	NO	0,8	0,4	0,9	0,0	0,0	0,000402	0,000393
7	7	5	5	1	Closed	Line	NO	0,3	0,2	0,4	0,0	0,0	0,000074	0,000072
8	5	11	11	1	Closed	Line	NO	0,8	0,5	1,0	0,0	0,0	0,000709	0,000693
9	7	8	8	1	Closed	Line	NO	1,8	0,9	2,0	0,0	0,0	0,000414	0,000229
10	8	9	9	1	Closed	Line	NO	1,4	0,7	1,6	0,0	0,0	0,000556	0,000544
11	9	10	10	1	Closed	Line	NO	0,9	0,4	1,0	0,0	0,0	0,000143	0,000079
12	10	10	11	1	Closed	Line	NO	0,8	0,3	0,8	0,0	0,0	0,000239	0,000234
13	11	11	12	2	Closed	Line	NO	0,5	0,3	0,6	0,0	0,0	0,000068	0,000066
14	11	11	12	3	Closed	Line	NO	0,5	0,3	0,6	0,0	0,0	0,000068	0,000066

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	Pu Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Are
1	1	1	20,00	1,00000	20,000	0,00	0,00	0,00	4,61	2,35	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2	1	20,00	0,99966	19,993	-0,01	0,08	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	3	1	20,00	0,99956	19,991	-0,01	0,21	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	4	1	20,00	0,99832	19,966	-0,03	0,09	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	5	1	20,00	0,99807	19,961	-0,03	0,78	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	6	1	20,00	0,99746	19,949	-0,05	0,82	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	7	1	20,00	0,99632	19,966	-0,03	0,39	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	8	1	20,00	0,99808	19,962	-0,03	0,50	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	9	1	20,00	0,99761	19,952	-0,04	0,12	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	10	1	20,00	0,99744	19,949	-0,04	0,55	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	11	1	20,00	0,99707	19,941	-0,05	1,04	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	12	1	20,00	0,99691	19,938	-0,05								

Imagen 7.2.1.3_03: Caso n°3 M datos obtenidos

7.2.1.4 Caso nº4 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.2.1.4_01: Caso nº4 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.4_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	$FP = \cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVAr]
Valverde	San Andrés	1,97	0,136	0,066
	Isora	3,63	0,250	0,121
	Las Playas	0,95	0,065	0,032
	Timijiraque	1,79	0,123	0,060
	Valverde	14,94	1,031	0,499
	Tamaduste	2,91	0,201	0,097
	Mocanal	8,56	0,591	0,286
	Guarazoca	2,95	0,204	0,099
	Resto municipio	7,93	0,547	0,265
Frontera	Las Puntas	2,73	0,188	0,091
	Tigaday	11,93	0,823	0,399
	Los Llanillos	2,65	0,183	0,089
	Sabinosa	2,12	0,147	0,071
	Resto municipio	17,89	1,234	0,598
El Pinar	Taibique	7,54	0,520	0,252
	Resto municipio	9,51	0,656	0,318
TOTALES		100,00	6,900	3,342
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]	6,900	23-8-19 12:20	
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]	7,667		

Tabla 7.2.1.4_01: Consumos Caso nº4 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.2.1.4_03.

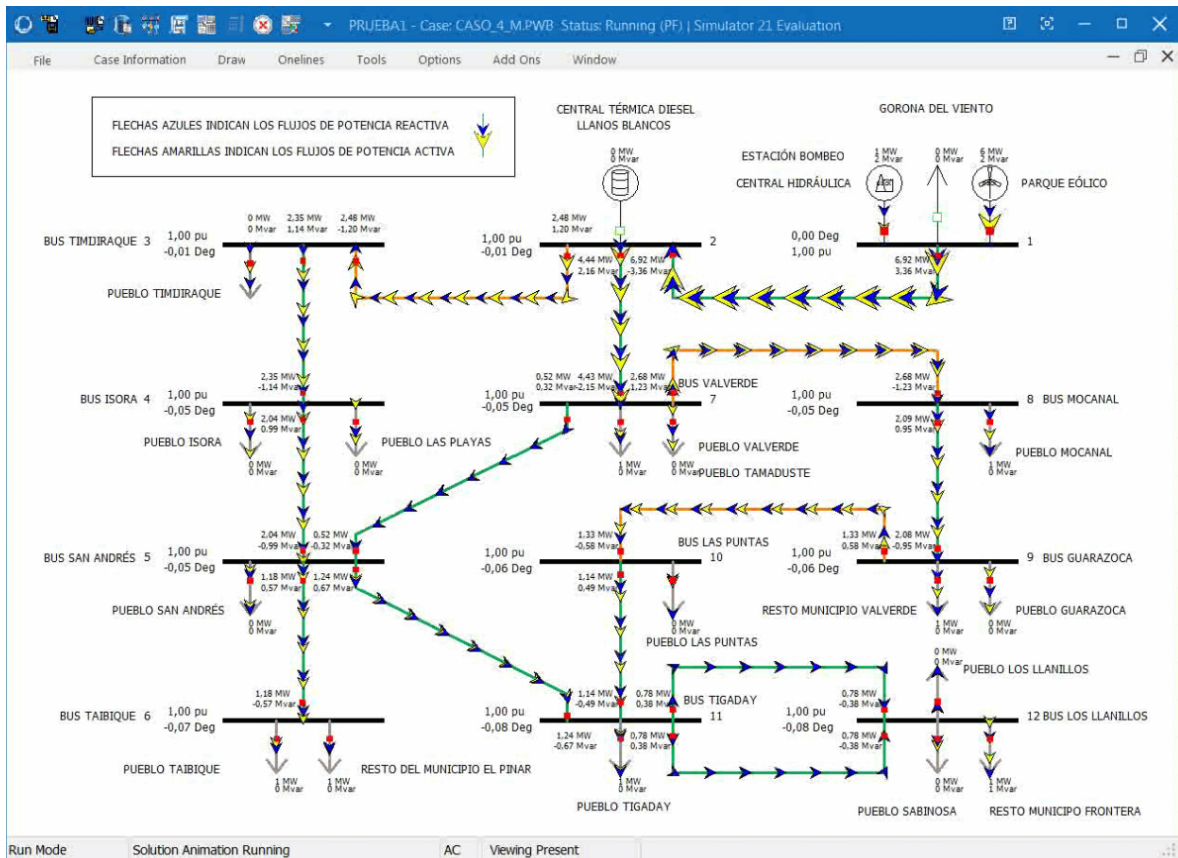


Imagen 7.2.1.4_02: Caso nº4 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	1	1	1	Closed	Line	NO	-6,9	-3,4	7,7	0,0	0,0	0,002947	0,002881
2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	2,5	1,2	2,8	0,0	0,0	0,000341	0,00189
3	2	7	7	1	Closed	Line	NO	4,4	2,2	4,9	0,0	0,0	0,007345	0,007182
4	3	4	4	1	Closed	Line	NO	2,4	1,1	2,6	0,0	0,0	0,003618	0,003537
5	4	5	5	1	Closed	Line	NO	2,0	1,0	2,3	0,0	0,0	0,000646	0,000632
6	5	6	6	1	Closed	Line	NO	1,2	0,6	1,3	0,0	0,0	0,000907	0,000887
7	7	5	5	1	Closed	Line	NO	0,5	0,3	0,6	0,0	0,0	0,000170	0,000166
8	5	11	11	1	Closed	Line	NO	1,2	0,7	1,4	0,0	0,0	0,001561	0,001526
9	7	8	8	1	Closed	Line	NO	2,7	1,2	2,9	0,0	0,0	0,000897	0,000497
10	8	9	9	1	Closed	Line	NO	2,1	0,9	2,3	0,0	0,0	0,001192	0,001166
11	10	10	10	1	Closed	Line	NO	1,3	0,6	1,5	0,0	0,0	0,000328	0,000182
12	10	11	11	1	Closed	Line	NO	1,1	0,5	1,2	0,0	0,0	0,000550	0,000538
13	11	11	12	2	Closed	Line	NO	0,8	0,4	0,9	0,0	0,0	0,000153	0,000150
14	11	11	12	3	Closed	Line	NO	0,8	0,4	0,9	0,0	0,0	0,000153	0,000150

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area
1	1	1	20,00	1,00000	20,000	0,00	0,000	0,000	6,92	3,36	0,00	0,00	0,00	
2	2	1	20,00	0,99949	19,990	-0,01	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3	3	1	20,00	0,99935	19,987	-0,01	0,123	0,060	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
4	4	1	20,00	0,99752	19,950	-0,05	0,315	0,153	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
5	5	1	20,00	0,99714	19,943	-0,05	0,136	0,066	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
6	6	1	20,00	0,99632	19,924	-0,07	1,176	0,570	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
7	7	1	20,00	0,99752	19,950	-0,05	1,232	0,596	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
8	8	1	20,00	0,99717	19,943	-0,05	0,591	0,286	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
9	9	1	20,00	0,99649	19,930	-0,06	0,731	0,364	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
10	10	1	20,00	0,99623	19,925	-0,06	0,188	0,091	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
11	11	1	20,00	0,99566	19,913	-0,08	0,823	0,399	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
12	12	1	20,00	0,99543	19,909	-0,08	1,564	0,758	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Imagen 7.2.1.4_03: Caso nº4 M datos obtenidos

7.2.1.5 Caso nº5 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:

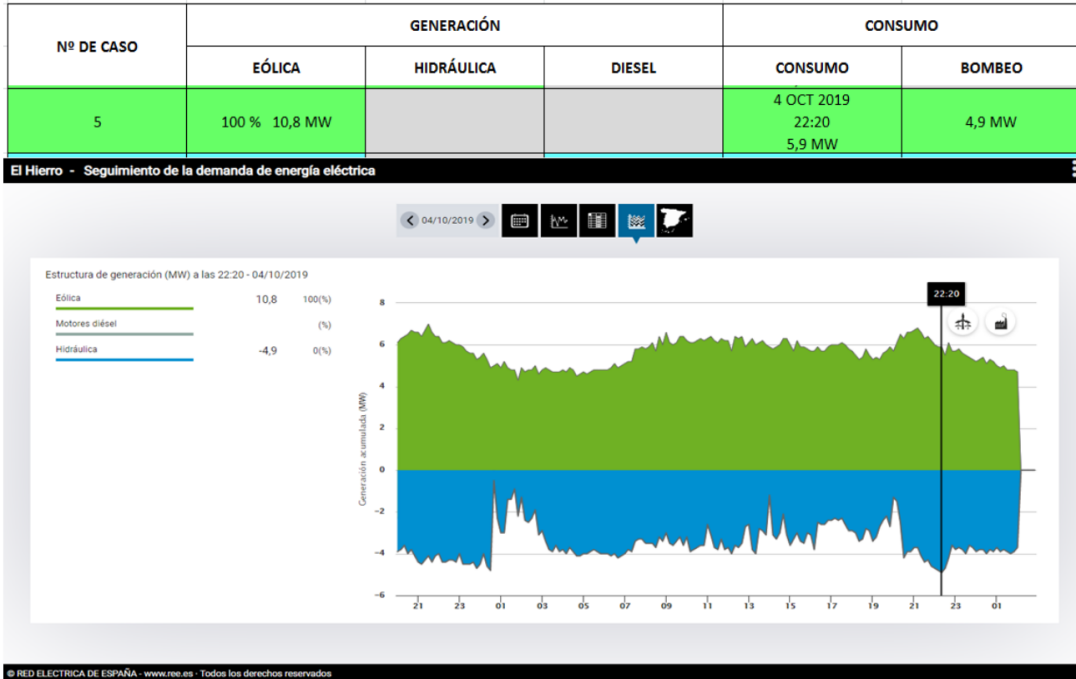


Imagen 7.2.1.5_01: Caso nº5 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.5_01*, se introducen en el archivo del Power World.

Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->		FP = COS(φ) = 0,90 = = 25,84193276 ° = = 0,451026811 rad	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]
Valverde	San Andrés	1,97	0,116	0,056
	Isora	3,63	0,214	0,104
	Las Playas	0,95	0,056	0,027
	Timijiraque	1,79	0,105	0,051
	Valverde	14,94	0,882	0,427
	Tamaduste	2,91	0,172	0,083
	Mocanal	8,56	0,505	0,245
	Guarazoca	2,95	0,174	0,084
	Resto municipio	7,93	0,468	0,227
Frontera	Las Puntas	2,73	0,161	0,078
	Tigaday	11,93	0,704	0,341
	Los Llanillos	2,65	0,157	0,076
	Sabinosa	2,12	0,125	0,061
El Pinar	Resto municipio	17,89	1,055	0,511
	Taibique	7,54	0,445	0,215
	Resto municipio	9,51	0,561	0,272
TOTALES		100,00	5,900	2,858
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]		5,900	20-8-19 21:27
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]		6,556	
INTRODUCIR VALORES DE REE	CONSUMO ESTACIÓN DE BOMBEO [MW]		4,900	
	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]		2,373	

Tabla 7.2.1.5_01: Consumos Caso nº5 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.2.1.5_03.

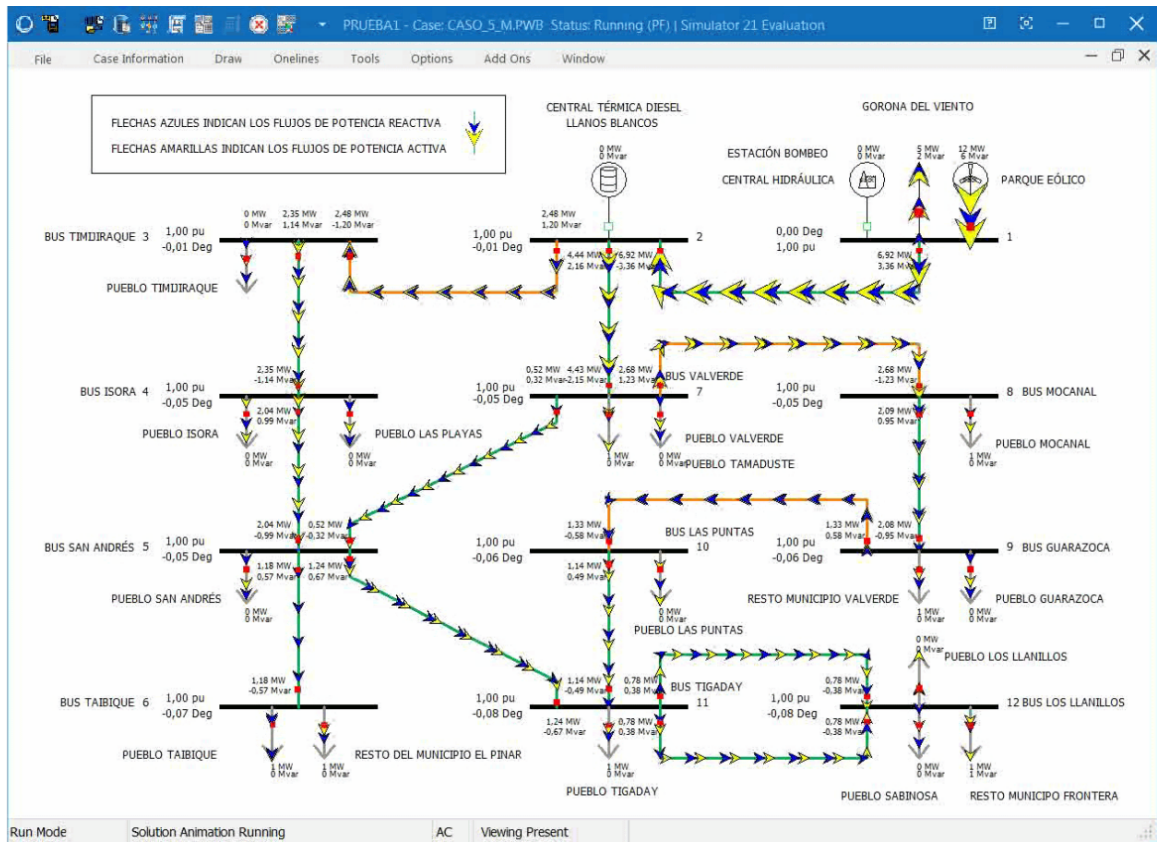


Imagen 7.2.1.5_02: Caso n°5 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	1	1	1	Closed	Line	NO	4,9	-3,4	7,7	0,0	0,0	0,002947	0,002881
2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	2,5	1,2	2,8	0,0	0,0	0,000341	0,000189
3	2	7	7	1	Closed	Line	NO	4,4	2,2	4,9	0,0	0,0	0,007345	0,007182
4	3	4	4	1	Closed	Line	NO	2,4	1,1	2,6	0,0	0,0	0,0003618	0,0003537
5	4	5	5	1	Closed	Line	NO	2,0	1,0	2,3	0,0	0,0	0,000646	0,000632
6	5	6	6	1	Closed	Line	NO	1,2	0,6	1,3	0,0	0,0	0,000907	0,000887
7	7	5	5	1	Closed	Line	NO	0,5	0,3	0,6	0,0	0,0	0,000170	0,000166
8	5	11	11	1	Closed	Line	NO	1,2	0,7	1,4	0,0	0,0	0,001561	0,001526
9	7	8	8	1	Closed	Line	NO	2,7	1,2	2,9	0,0	0,0	0,000897	0,000497
10	8	9	9	1	Closed	Line	NO	2,1	0,9	2,3	0,0	0,0	0,001192	0,001166
11	9	10	10	1	Closed	Line	NO	1,3	0,6	1,5	0,0	0,0	0,000328	0,000182
12	10	11	11	1	Closed	Line	NO	1,1	0,5	1,2	0,0	0,0	0,000550	0,000538
13	11	12	12	2	Closed	Line	NO	0,8	0,4	0,9	0,0	0,0	0,000153	0,000150
14	11	12	12	3	Closed	Line	NO	0,8	0,4	0,9	0,0	0,0	0,000153	0,000150

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act S Shunt Mvar	Area
1	1	1	20,00	1,00000	20,000	0,00	4,900	2,373	11,82	5,73	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2	1	20,00	0,99949	19,990	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	3	1	20,00	0,99935	19,987	-0,01	0,123	0,060	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	4	1	20,00	0,99752	19,950	-0,05	0,315	0,153	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	5	1	20,00	0,99714	19,943	-0,05	0,136	0,066	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	6	1	20,00	0,99622	19,924	-0,07	1,176	0,570	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	7	1	20,00	0,99752	19,950	-0,05	1,232	0,596	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	8	1	20,00	0,99717	19,943	-0,05	0,591	0,286	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	9	1	20,00	0,99649	19,930	-0,06	0,751	0,364	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	10	1	20,00	0,99623	19,925	-0,06	0,188	0,091	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	11	1	20,00	0,99566	19,913	-0,08	0,823	0,399	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	12	1	20,00	0,99543	19,909	-0,08	1,564	0,758	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Imagen 7.2.1.5_03: Caso n°5 M datos obtenidos

7.2.1.6 Caso nº6 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.2.1.6_01: Caso nº6 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.6_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	FP = $\cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVAR]
Valverde	San Andrés	1,97	0,114	0,055
	Isora	3,63	0,210	0,102
	Las Playas	0,95	0,055	0,027
	Timijiraque	1,79	0,104	0,050
	Valverde	14,94	0,867	0,420
	Tamaduste	2,91	0,169	0,082
	Mocanal	8,56	0,497	0,240
	Guarazoca	2,95	0,171	0,083
	Resto municipio	7,93	0,460	0,223
Frontera	Las Puntas	2,73	0,158	0,077
	Tigaday	11,93	0,692	0,335
	Los Llanillos	2,65	0,154	0,075
	Sabinosa	2,12	0,123	0,060
	Resto municipio	17,89	1,038	0,502
El Pinar	Taibique	7,54	0,437	0,212
	Resto municipio	9,51	0,552	0,267
TOTALES		100,00	5,800	2,809
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]	5,800	20-8-19 21:27	
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]	6,444		
INTRODUCIR VALORES DE REE	CONSUMO ESTACIÓN DE BOMBEO [MW]	1,200		
	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVAR]	0,581		

Tabla 7.2.1.6_01: Consumos Caso nº6 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la *Imagen 7.2.1.6_03*.

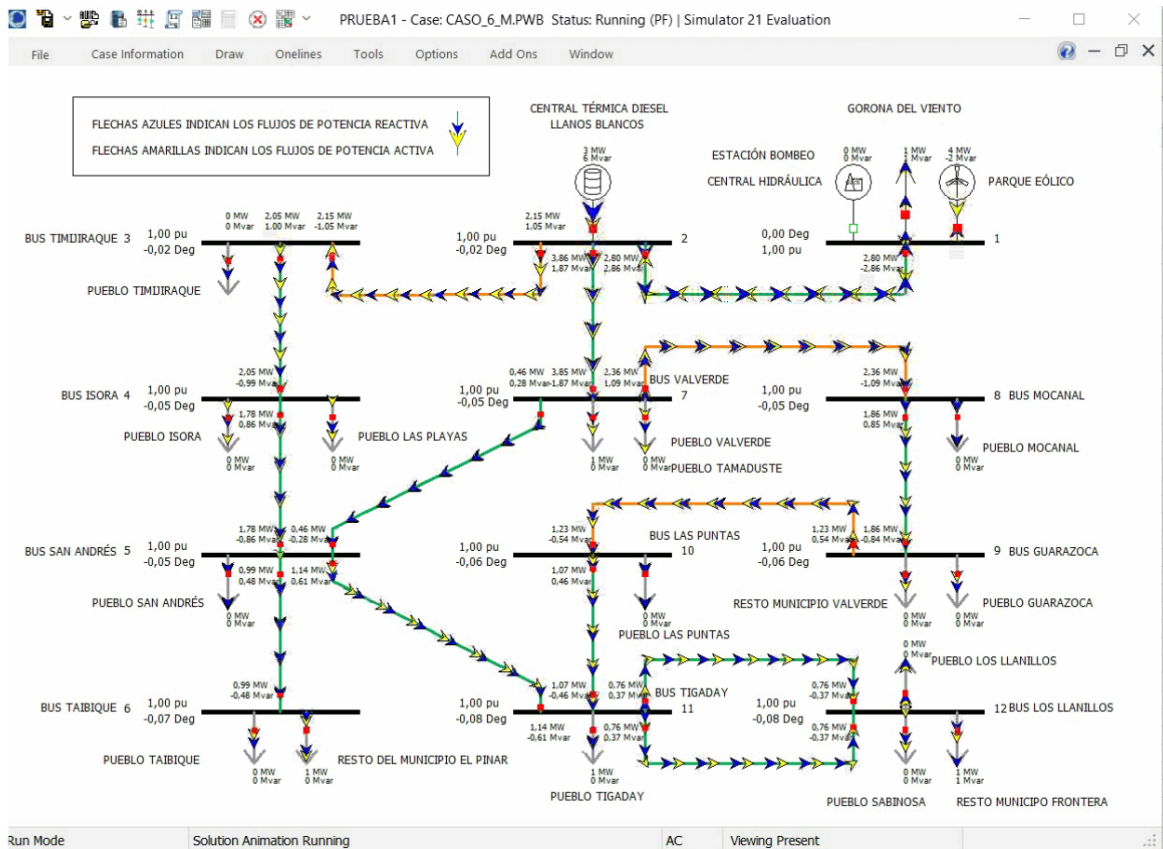


Imagen 7.2.1.6_02: Caso n°6 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	1	1	1	Closed	Line	NO	-2,8	2,9	4,0	0,0	0,0	0,000797	0,000779
2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	2,2	1,0	2,4	0,0	0,0	0,000257	0,000142
3	2	7	7	1	Closed	Line	NO	3,9	1,9	4,3	0,0	0,0	0,005541	0,005418
4	3	4	4	1	Closed	Line	NO	2,0	1,0	2,3	0,0	0,0	0,002736	0,002675
5	4	5	5	1	Closed	Line	NO	1,8	0,9	2,0	0,0	0,0	0,000494	0,000483
6	5	6	6	1	Closed	Line	NO	1,0	0,5	1,1	0,0	0,0	0,000640	0,000626
7	7	5	5	1	Closed	Line	NO	0,5	0,3	0,5	0,0	0,0	0,000132	0,000129
8	5	11	11	1	Closed	Line	NO	1,1	0,6	1,3	0,0	0,0	0,001300	0,001271
9	7	8	8	1	Closed	Line	NO	2,4	1,1	2,6	0,0	0,0	0,000694	0,000394
10	8	9	9	1	Closed	Line	NO	1,9	0,8	2,0	0,0	0,0	0,000946	0,000925
11	9	10	10	1	Closed	Line	NO	1,2	0,5	1,3	0,0	0,0	0,000278	0,000154
12	10	11	11	1	Closed	Line	NO	1,1	0,5	1,2	0,0	0,0	0,000479	0,000468
13	11	11	12	2	Closed	Line	NO	0,8	0,4	0,8	0,0	0,0	0,000143	0,000140
14	11	11	12	3	Closed	Line	NO	0,8	0,4	0,8	0,0	0,0	0,000143	0,000140

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area I
1			20,00	1,000000	20,000	0,00			3,999	-2,276				0,00
2	2	1	20,00	1,000000	20,000	-0,02	1,200	0,581		3,212	5,778			0,00
3	3	1	20,00	0,99988	19,998	-0,02	0,104	0,050						0,00
4	4	1	20,00	0,99828	19,966	-0,05	0,265	0,129						0,00
5	5	1	20,00	0,99795	19,959	-0,05	0,114	0,055						0,00
6	6	1	20,00	0,99718	19,944	-0,07	0,989	0,479						0,00
7	7	1	20,00	0,99829	19,966	-0,05	1,036	0,502						0,00
8	8	1	20,00	0,99798	19,960	-0,05	0,497	0,240						0,00
9	9	1	20,00	0,99737	19,947	-0,06	0,631	0,306						0,00
10	10	1	20,00	0,99714	19,943	-0,06	0,158	0,077						0,00
11	11	1	20,00	0,99660	19,932	-0,08	0,692	0,335						0,00
12	12	1	20,00	0,99638	19,928	-0,08	1,511	0,733						0,00

Imagen 7.2.1.6_03: Caso n°6 M datos obtenidos

7.2.1.7 Caso nº7 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:

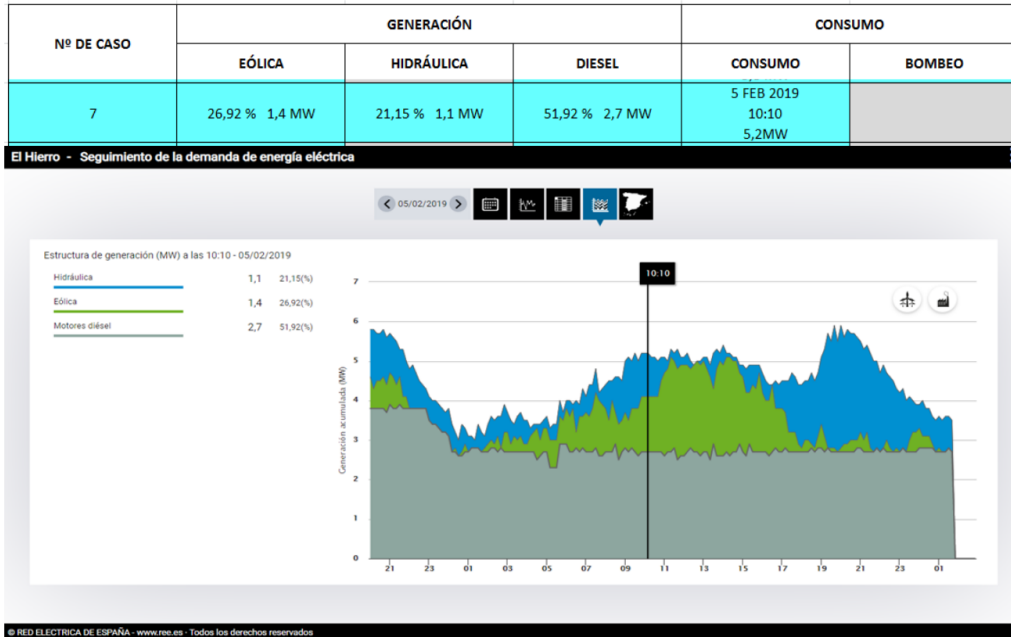


Imagen 7.2.1.7_01: Caso nº7 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.7_01*, se introducen en el archivo del Power World.

MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]
Valverde	San Andrés	1,97	0,102	0,050
	Isora	3,63	0,189	0,091
	Las Playas	0,95	0,049	0,024
	Timijiraque	1,79	0,093	0,045
	Valverde	14,94	0,777	0,376
	Tamaduste	2,91	0,151	0,073
	Mocanal	8,56	0,445	0,216
	Guarazoca	2,95	0,154	0,074
	Resto municipio	7,93	0,412	0,200
Frontera	Las Puntas	2,73	0,142	0,069
	Tigaday	11,93	0,620	0,300
	Los Llanillos	2,65	0,138	0,067
	Sabinosa	2,12	0,110	0,054
	Resto municipio	17,89	0,930	0,451
El Pinar	Taibique	7,54	0,392	0,190
	Resto municipio	9,51	0,494	0,239
TOTALES		100,00	5,200	2,518
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]		5,200	5-2-19 10:10
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]		5,778	

Tabla 7.2.1.7_01: Consumos Caso nº7 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la *Imagen 7.2.1.7_03*.

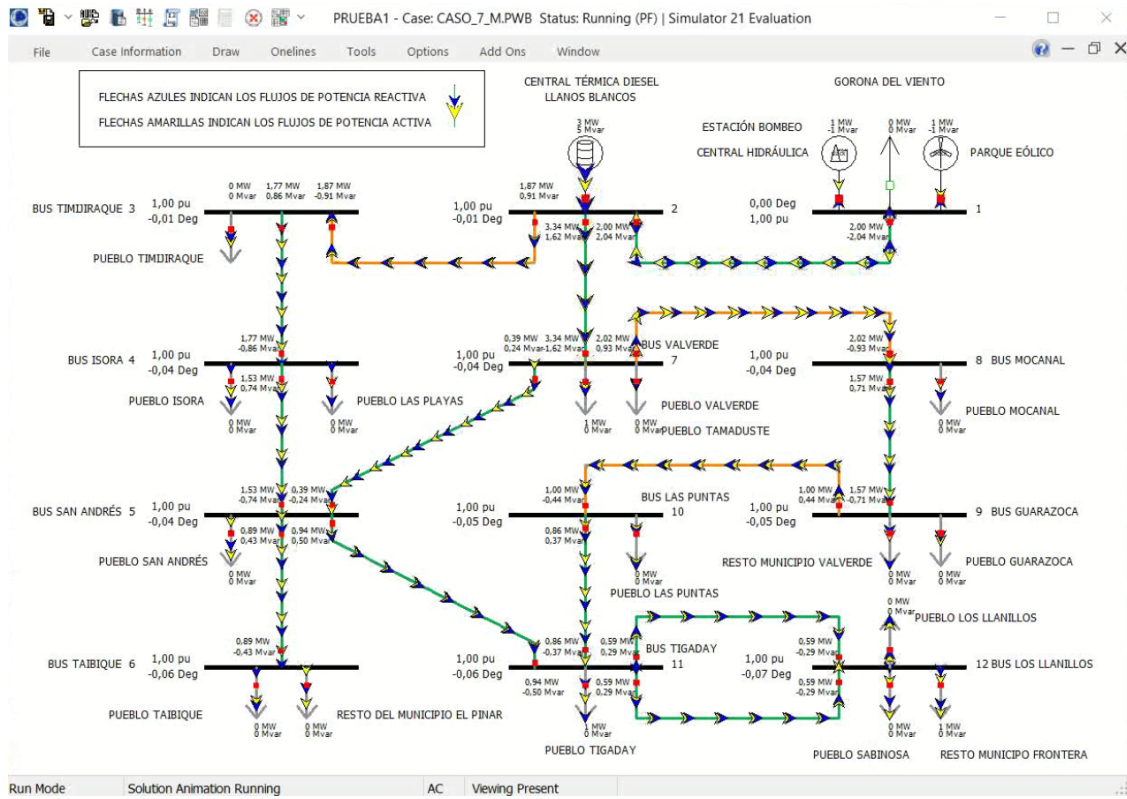


Imagen 7.2.1.7_02: Caso nº7 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss	
1	2	2	1	1	Closed	Line	NO	-2,0	2,0	2,9	0,0	0,0	0,000406	0,000397	
2	2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	1,9	0,9	2,1	0,0	0,0	0,000193	0,000107
3	2	2	7	7	1	Closed	Line	NO	3,3	1,6	3,7	0,0	0,0	0,004159	0,004066
4	3	3	4	4	1	Closed	Line	NO	1,9	0,9	2,0	0,0	0,0	0,000348	0,000203
5	4	4	5	5	1	Closed	Line	NO	1,5	0,7	1,7	0,0	0,0	0,000366	0,000357
6	5	5	6	6	1	Closed	Line	NO	0,9	0,4	1,0	0,0	0,0	0,000514	0,000502
7	7	7	5	5	1	Closed	Line	NO	0,4	0,2	0,5	0,0	0,0	0,000096	0,000094
8	5	5	11	11	1	Closed	Line	NO	0,9	0,5	1,1	0,0	0,0	0,000894	0,000864
9	7	7	8	8	1	Closed	Line	NO	2,0	0,9	2,2	0,0	0,0	0,000508	0,000281
10	8	8	9	9	1	Closed	Line	NO	1,6	0,7	1,7	0,0	0,0	0,000675	0,000660
11	9	9	10	10	1	Closed	Line	NO	1,0	0,4	1,1	0,0	0,0	0,000186	0,000103
12	10	10	11	11	1	Closed	Line	NO	0,9	0,4	0,9	0,0	0,0	0,000311	0,000304
13	11	11	12	12	2	Closed	Line	NO	0,6	0,3	0,7	0,0	0,0	0,000087	0,000085
14	11	11	12	12	3	Closed	Line	NO	0,6	0,3	0,7	0,0	0,0	0,000087	0,000085

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area M
1	2	1	20,00	1,00000	20,000	0,00	0,000	0,000	1,997	-2,042		0,00	0,00	
2	2	1	20,00	1,00000	20,000	-0,01			3,212	4,571		0,00	0,00	
3	3	1	20,00	0,99889	19,998	-0,01	0,093	0,045				0,00	0,00	
4	4	1	20,00	0,99852	19,970	-0,04	0,238	0,115				0,00	0,00	
5	5	1	20,00	0,99823	19,965	-0,04	0,102	0,050				0,00	0,00	
6	6	1	20,00	0,99754	19,951	-0,06	0,886	0,429				0,00	0,00	
7	7	1	20,00	0,99852	19,970	-0,04	0,928	0,449				0,00	0,00	
8	8	1	20,00	0,99825	19,965	-0,04	0,445	0,216				0,00	0,00	
9	9	1	20,00	0,99774	19,955	-0,05	0,566	0,274				0,00	0,00	
10	10	1	20,00	0,99755	19,951	-0,05	0,142	0,069				0,00	0,00	
11	11	1	20,00	0,99712	19,942	-0,06	0,620	0,300				0,00	0,00	
12	12	1	20,00	0,99694	19,939	-0,07	1,178	0,572				0,00	0,00	

Imagen 7.2.1.7_03: Caso nº7 M datos obtenidos

7.2.1.8 Caso nº8 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.2.1.8_01: Caso nº8 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.8_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	FP = $\cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]
Valverde	San Andrés	1,97	0,128	0,062
	Isora	3,63	0,236	0,114
	Las Playas	0,95	0,062	0,030
	Timijiraque	1,79	0,116	0,056
	Valverde	14,94	0,971	0,470
	Tamaduste	2,91	0,189	0,092
	Mocanal	8,56	0,556	0,270
	Resto municipio	2,95	0,192	0,093
Frontera	Resto municipio	7,93	0,516	0,250
	Las Puntas	2,73	0,177	0,086
	Tigaday	11,93	0,775	0,375
	Los Llanillos	2,65	0,172	0,084
	Sabinosa	2,12	0,138	0,067
El Pinar	Resto municipio	17,89	1,163	0,563
	Taibique	7,54	0,490	0,237
	Resto municipio	9,51	0,618	0,299
TOTALES		100,00	6,500	3,148
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]	6,500	18-10-19 22:20	
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]	7,222		

Tabla 7.2.1.8_01: Consumos Caso nº8 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.2.1.8_03.

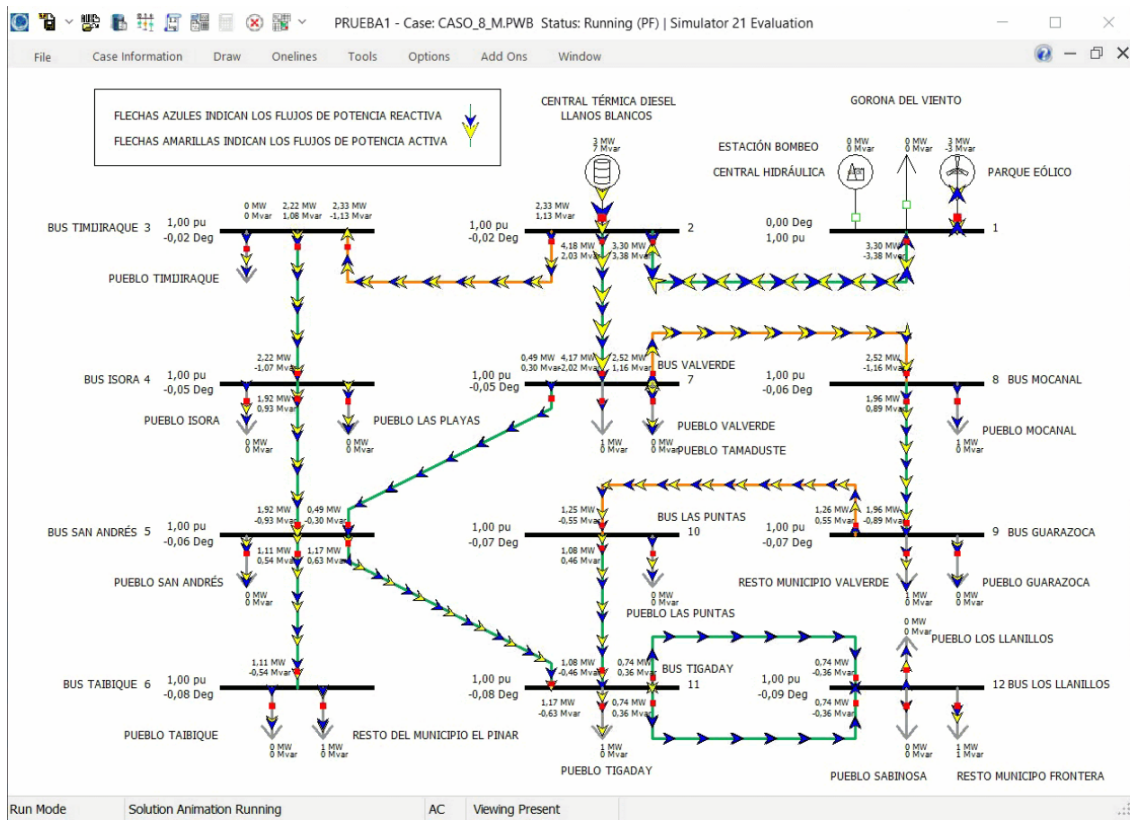


Imagen 7.2.1.8_02: Caso nº8 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfrmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	1 1	1	1	Closed	Line	NO	-3,3	3,4	4,7	0,0	0,0	0,001112	0,001087
2	2	3 3	1	1	Closed	Line	NO	2,3	1,1	2,6	0,0	0,0	0,000302	0,000167
3	2	7 7	1	1	Closed	Line	NO	4,2	2,0	4,6	0,0	0,0	0,006508	0,006363
4	3	4 4	1	1	Closed	Line	NO	2,2	1,1	2,5	0,0	0,0	0,003206	0,003134
5	4	5 5	1	1	Closed	Line	NO	1,9	0,9	2,1	0,0	0,0	0,000572	0,000559
6	5	6 6	1	1	Closed	Line	NO	1,1	0,5	1,2	0,0	0,0	0,000804	0,000786
7	7	5 5	1	1	Closed	Line	NO	0,5	0,3	0,6	0,0	0,0	0,000151	0,000147
8	5	11 11	1	1	Closed	Line	NO	1,2	0,6	1,3	0,0	0,0	0,001383	0,001352
9	7	8 8	1	1	Closed	Line	NO	2,5	1,2	2,8	0,0	0,0	0,000795	0,000440
10	8	9 9	1	1	Closed	Line	NO	2,0	0,9	2,2	0,0	0,0	0,001057	0,001033
11	9	10 10	1	1	Closed	Line	NO	1,3	0,5	1,4	0,0	0,0	0,000291	0,000161
12	10	11 11	1	1	Closed	Line	NO	1,1	0,5	1,2	0,0	0,0	0,000487	0,000476
13	11	11 11	2	2	Closed	Line	NO	0,7	0,4	0,8	0,0	0,0	0,000136	0,000133
14	11	11 11	3	3	Closed	Line	NO	0,7	0,4	0,8	0,0	0,0	0,000136	0,000133

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kv	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area N
1		1	20,00	1,00000	20,000	0,00	0,000	0,000	3,304	-3,378				
2		1	20,00	0,99987	19,997	-0,02	0,116	0,056	3,212	6,542				
3		1	20,00	0,99814	19,963	-0,05	0,258	0,144						
4		1	20,00	0,99779	19,956	-0,06	0,128	0,062						
5		1	20,00	0,99692	19,938	-0,08	1,108	0,536						
6		1	20,00	0,99814	19,963	-0,05	1,160	0,562						
7		1	20,00	0,99782	19,956	-0,06	0,556	0,270						
8		1	20,00	0,99717	19,943	-0,07	0,708	0,343						
9		1	20,00	0,99693	19,939	-0,07	0,177	0,086						
10		1	20,00	0,99639	19,928	-0,08	0,775	0,375						
11		1	20,00	0,99617	19,923	-0,09	1,473	0,714						
12		1	20,00	0,99617	19,923	-0,09	1,473	0,714						

Imagen 7.2.1.8_03: Caso nº8 M datos obtenidos

7.2.1.9 Caso nº9 M

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.2.1.9_01: Caso nº9 M

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.2.1.9_01*, se introducen en el archivo del Power World.

MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]
	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->		FP = COS(φ) = 0,90 = 25,84193276 ° = 0,451026811 rad	INDUCTIVO
Valverde	San Andrés	1,97	0,122	0,059
	Isora	3,63	0,225	0,109
	Las Playas	0,95	0,059	0,028
	Timijiraque	1,79	0,111	0,054
	Valverde	14,94	0,926	0,449
	Tamaduste	2,91	0,180	0,087
	Mocanal	8,56	0,531	0,257
	Guarazoca	2,95	0,183	0,089
	Resto municipio	7,93	0,492	0,238
Frontera	Las Puntas	2,73	0,169	0,082
	Tigaday	11,93	0,739	0,358
	Los Llanillos	2,65	0,164	0,080
	Sabinosa	2,12	0,132	0,064
Resto municipio	17,89	1,109	0,537	
El Pinar	Taibique	7,54	0,467	0,226
	Resto municipio	9,51	0,590	0,286
TOTALES		100,00	6,200	3,003
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]		6,200	17-12-19 20:20
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]		6,889	

Tabla 7.2.1.9_01: Consumos Caso nº9 M

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.2.1.9_03.

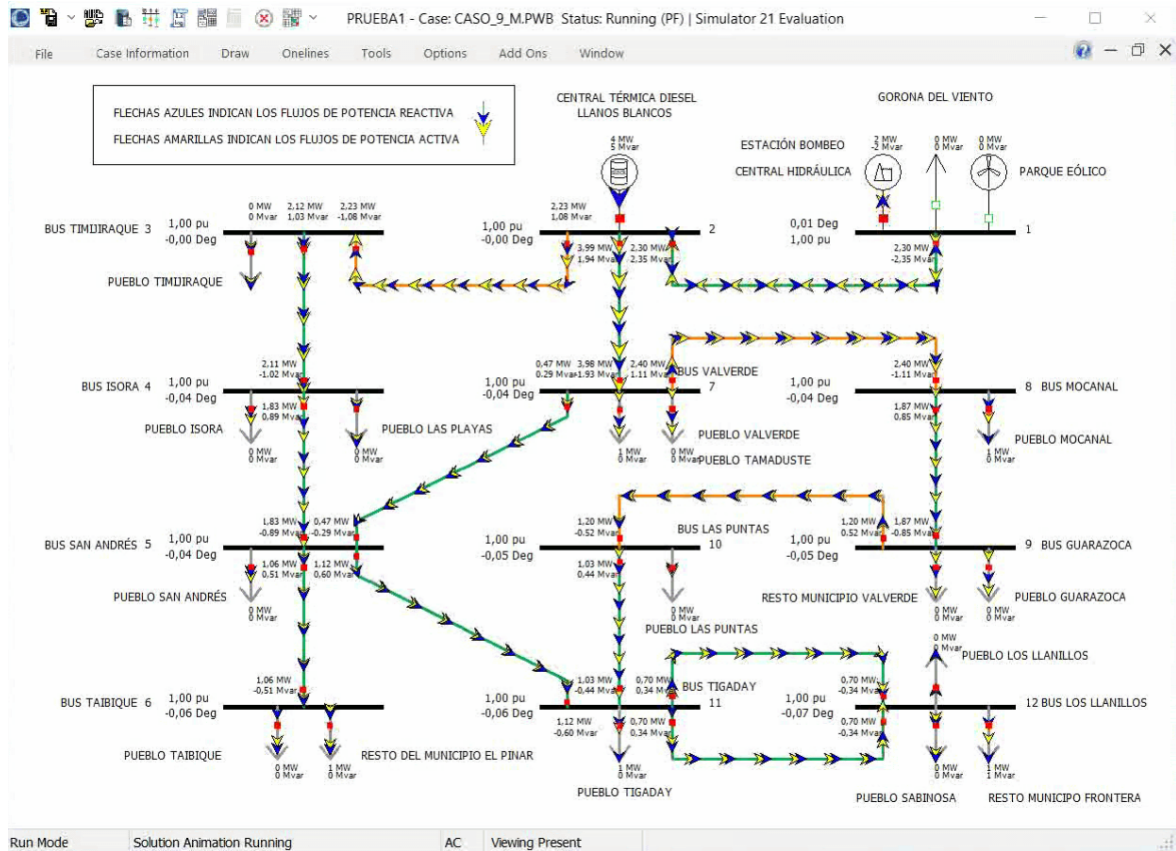


Imagen 7.2.1.9_02: Caso nº9 M simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfrmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	1	1	1	Closed	Line	NO	-2,3	2,4	3,3	0,0	0,0	0,000539	0,000527
2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	2,2	1,1	2,5	0,0	0,0	0,000275	0,000152
3	2	7	7	1	Closed	Line	NO	4,0	1,9	4,4	0,0	0,0	0,0005919	0,0005787
4	3	4	4	1	Closed	Line	NO	2,1	1,0	2,4	0,0	0,0	0,0002916	0,0002850
5	4	5	5	1	Closed	Line	NO	1,8	0,9	2,0	0,0	0,0	0,000520	0,000509
6	5	6	6	1	Closed	Line	NO	1,1	0,5	1,2	0,0	0,0	0,000732	0,000715
7	7	5	5	1	Closed	Line	NO	0,5	0,3	0,5	0,0	0,0	0,000137	0,000134
8	5	11	11	1	Closed	Line	NO	1,1	0,6	1,3	0,0	0,0	0,001257	0,001229
9	7	8	8	1	Closed	Line	NO	2,4	1,1	2,6	0,0	0,0	0,000723	0,000400
10	8	9	9	1	Closed	Line	NO	1,9	0,9	2,1	0,0	0,0	0,000961	0,000939
11	9	10	10	1	Closed	Line	NO	1,2	0,5	1,3	0,0	0,0	0,000264	0,000146
12	10	11	11	1	Closed	Line	NO	1,0	0,4	1,1	0,0	0,0	0,000443	0,000433
13	11	12	12	2	Closed	Line	NO	0,7	0,3	0,8	0,0	0,0	0,000123	0,000121
14	11	11	11	3	Closed	Line	NO	0,7	0,3	0,8	0,0	0,0	0,000123	0,000121

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area N
1	1	1	20,00	1,00000	20,000	-0,01	0,000	0,000	2,300	-2,351	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2	1	20,00	1,00000	20,000	-0,00	0,000	0,000	3,914	5,369	0,00	0,00	0,00	0,00
3	3	1	20,00	0,99987	19,997	-0,00	0,111	0,054	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
4	4	1	20,00	0,99923	19,965	-0,04	0,284	0,137	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	5	1	20,00	0,99789	19,958	-0,04	0,122	0,059	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
6	6	1	20,00	0,99707	19,941	-0,06	1,057	0,512	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
7	7	1	20,00	0,99823	19,965	-0,04	1,106	0,536	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	8	1	20,00	0,99792	19,958	-0,04	0,531	0,257	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
9	9	1	20,00	0,99731	19,946	-0,05	0,675	0,327	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	10	1	20,00	0,99708	19,942	-0,05	0,169	0,082	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
11	11	1	20,00	0,99656	19,931	-0,06	0,739	0,358	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
12	12	1	20,00	0,99635	19,927	-0,07	1,405	0,681	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00

Imagen 7.2.1.9_03: Caso nº9 M datos obtenidos

7.3 Casos de estudio en red radial

Respecto a los casos de estudio en red radial solo indicar que se van a utilizar los casos 1, 4 y 7. Los más relevantes como se justifica en el siguiente apartado.

7.3.1 Red radial de la isla

El motivo de que se analicen solo 3 casos en red radial, es por que su uso suele ser común pero se puede dar el caso de emplear esta configuración por lo que la red queda con la siguiente configuración.

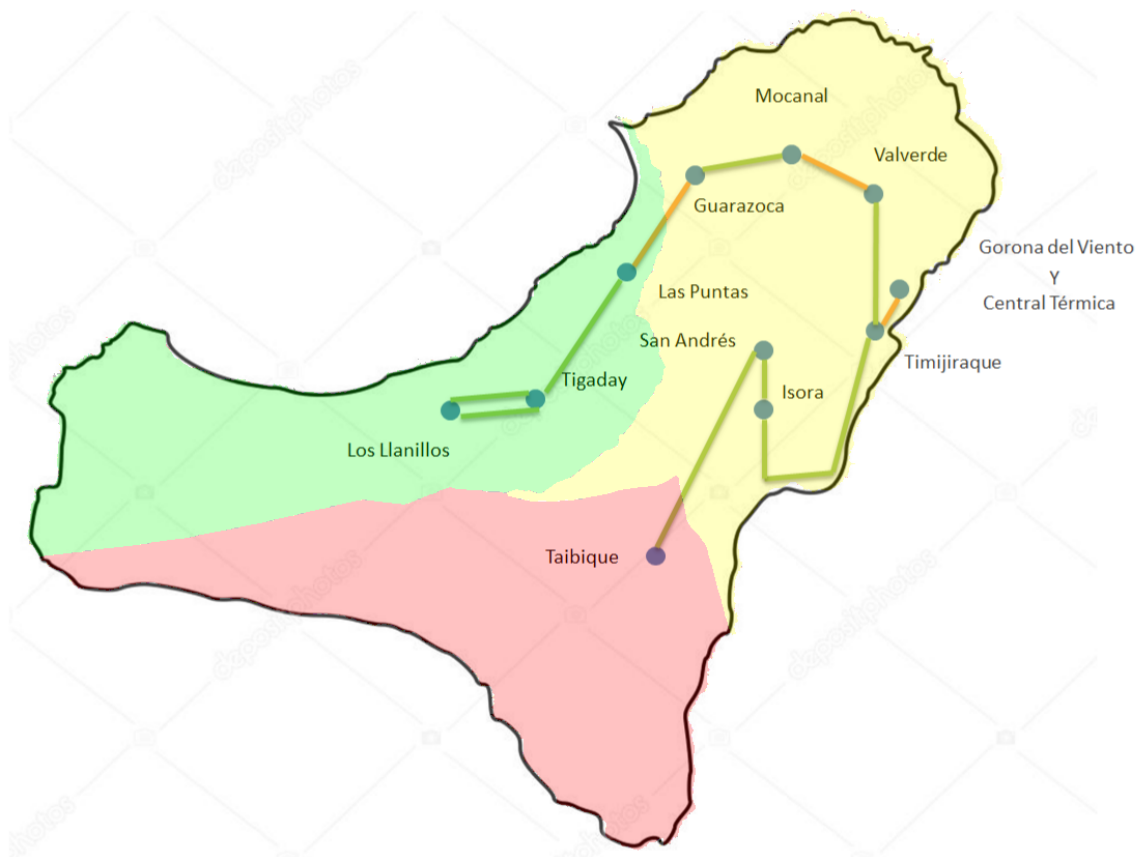


Imagen 7.2.1_01: Red de distribución (Radial)

Una red radial se caracteriza por parecerse a una configuración en la que los buses están colocados en "serie", por lo que los extremos no se unen encerrándose en un bucle como ocurre en la red mallada. Para su simulación se han desconectado las líneas que unen los BUSES de Valverde y San Andrés junto con el tramo de San Andrés con Tigaday.

7.3.1.1 Caso nº1 R

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.3.1.1_01: Caso nº1 R

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.3.1.1_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	FP = COS(φ) = 0,90 = = 25,84193276 ° = = 0,451026811 rad	INDUCTIVO
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]
Valverde	San Andrés	1,97	0,122
	Isora	3,63	0,225
	Las Playas	0,95	0,059
	Timijiraque	1,79	0,111
	Valverde	14,94	0,926
	Tamaduste	2,91	0,180
	Mocanal	8,56	0,531
	Guarazoca	2,95	0,183
	Resto municipio	7,93	0,492
Frontera	Las Puntas	2,73	0,169
	Tigaday	11,93	0,739
	Los Llanillos	2,65	0,164
	Sabinosa	2,12	0,132
	Resto municipio	17,89	1,109
El Pinar	Taibique	7,54	0,467
	Resto municipio	9,51	0,590
TOTALES		100,00	6,200
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]	6,200	30-5-19 12:30
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]	6,889	

Tabla 7.3.1.1_01: Consumos Caso nº1 R

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.3.1.1_03.

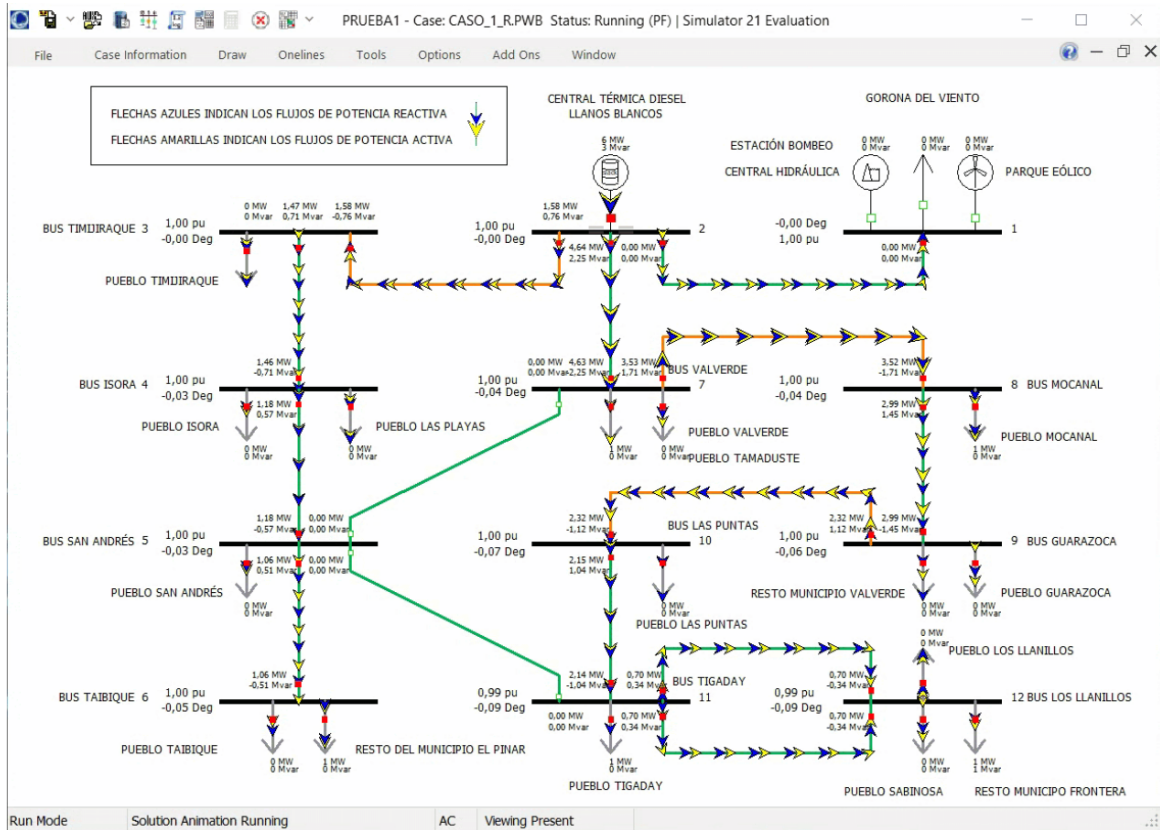


Imagen 7.3.1.1_02: Caso nº1 R simulación

Model Explorer: Branches State

Branch	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	2	1	1	1	Closed	Line	NO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000000	0,000000
2	2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	1,6	0,8	1,8	0,0	0,0	0,000138	0,000076
3	2	2	7	7	1	Closed	Line	NO	4,6	2,3	5,2	0,0	0,0	0,000820	0,007841
4	3	3	4	4	1	Closed	Line	NO	1,5	0,7	1,6	0,0	0,0	0,001399	0,001367
5	4	4	5	5	1	Closed	Line	NO	1,2	0,6	1,3	0,0	0,0	0,000216	0,000212
6	5	5	6	6	1	Closed	Line	NO	1,1	0,5	1,2	0,0	0,0	0,000731	0,000714
7	7	7	5	5	1	Open	Line	NO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000000	0,000000
8	5	5	11	11	1	Open	Line	NO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,000000	0,000000
9	7	7	8	8	1	Closed	Line	NO	3,5	1,7	3,9	0,0	0,0	0,001584	0,000877
10	8	8	9	9	1	Closed	Line	NO	3,0	1,5	3,3	0,0	0,0	0,002515	0,002459
11	9	9	10	10	1	Closed	Line	NO	2,3	1,1	2,6	0,0	0,0	0,001028	0,000569
12	10	10	11	11	1	Closed	Line	NO	2,1	1,0	2,4	0,0	0,0	0,002017	0,001972
13	11	11	12	12	2	Closed	Line	NO	0,7	0,3	0,8	0,0	0,0	0,000124	0,000121
14	11	11	12	12	3	Closed	Line	NO	0,7	0,3	0,8	0,0	0,0	0,000124	0,000121

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area N
1	1	1	20,00	1,00000	20,000	-0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
2	2	1	20,00	1,00000	20,000	-0,00	0,000	0,000	0,000	6,217	3,019	0,00	0,00	0,00
3	3	1	20,00	0,99991	19,998	-0,00	0,111	0,054	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
4	4	1	20,00	0,99877	19,975	-0,03	0,284	0,137	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	5	1	20,00	0,99855	19,971	-0,03	0,122	0,059	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
6	6	1	20,00	0,99773	19,955	-0,05	1,057	0,512	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
7	7	1	20,00	0,99794	19,959	-0,04	1,106	0,536	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	8	1	20,00	0,99748	19,950	-0,04	0,531	0,257	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
9	9	1	20,00	0,99648	19,930	-0,06	0,675	0,327	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
10	10	1	20,00	0,99602	19,920	-0,07	0,169	0,082	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
11	11	1	20,00	0,99491	19,898	-0,09	0,739	0,358	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
12	12	1	20,00	0,99470	19,894	-0,09	1,405	0,681	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00

Imagen 7.3.1.1_03: Caso nº1 R datos obtenidos

7.3.1.2 Caso nº4 R

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.3.1.2_01: Caso nº4 R

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.3.1.2_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	FP = $\cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]
Valverde	San Andrés	1,97	0,136
	Isora	3,63	0,250
	Las Playas	0,95	0,065
	Timijiraque	1,79	0,123
	Valverde	14,94	1,031
	Tamaduste	2,91	0,201
	Mocanal	8,56	0,591
	Guarazoca	2,95	0,204
Frontera	Resto municipio	7,93	0,547
	Las Puntas	2,73	0,188
	Tigaday	11,93	0,823
	Los Llanillos	2,65	0,183
	Sabinosa	2,12	0,147
El Pinar	Resto municipio	17,89	1,234
	Taibique	7,54	0,520
	Resto municipio	9,51	0,656
TOTALES		100,00	6,900
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]	6,900	23-8-19 12:20
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]	7,667	

Tabla 7.3.1.2_01: Consumos Caso nº4 R

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la *Imagen 7.3.1.2_03*.

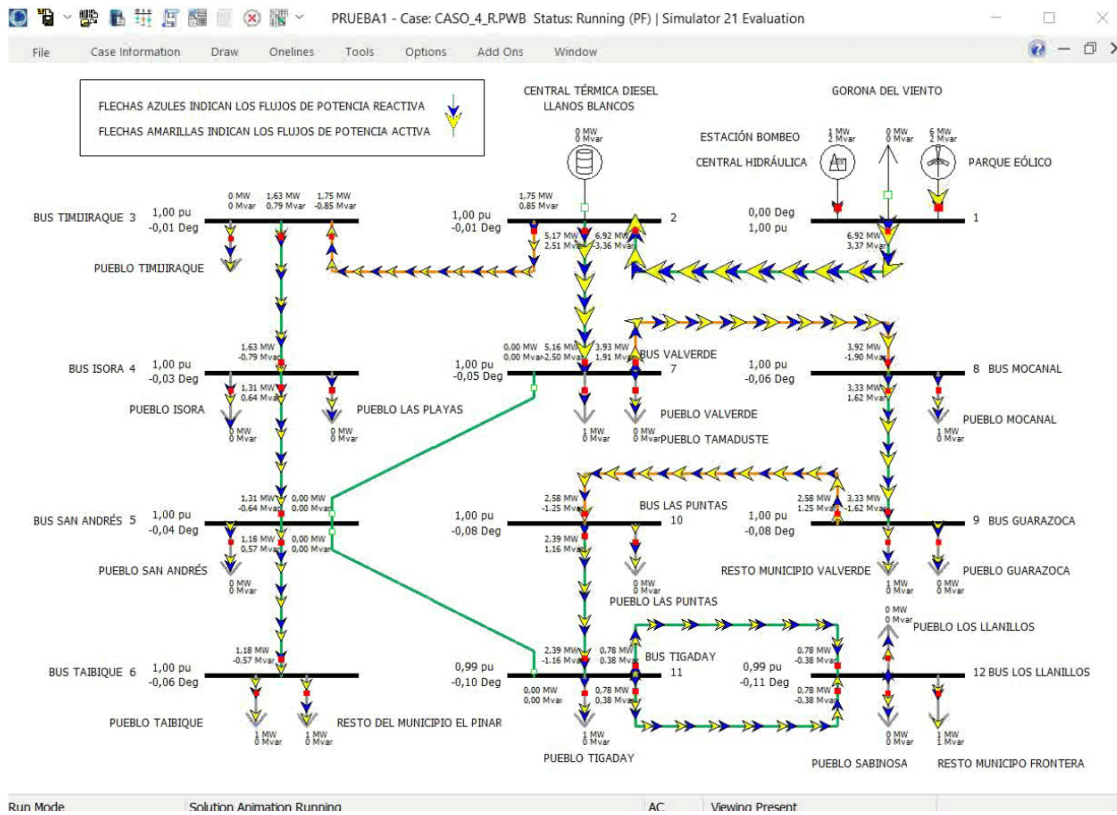


Imagen 7.3.1.2_02: Caso nº4 R simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	11	1	1	Closed	Line	NO	-6,921	-3,363	7,7	0,0	0,0	0,002951	0,002885
2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	1,753	0,852	1,9	0,0	0,0	0,000171	0,000095
3	2	7	7	1	Closed	Line	NO	5,168	2,511	5,7	0,0	0,0	0,009557	0,009735
4	3	4	4	1	Closed	Line	NO	1,630	0,792	1,8	0,0	0,0	0,001734	0,001695
5	4	5	5	1	Closed	Line	NO	1,313	0,637	1,5	0,0	0,0	0,000269	0,000263
6	5	6	6	1	Closed	Line	NO	1,177	0,571	1,3	0,0	0,0	0,000906	0,000886
7	7	5	5	1	Open	Line	NO	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,000000	0,000000
8	5	11	11	1	Open	Line	NO	0,000	0,000	0,0	0,0	0,0	0,000000	0,000000
9	7	8	8	1	Closed	Line	NO	3,926	1,906	4,4	0,0	0,0	0,001967	0,001089
10	8	9	9	1	Closed	Line	NO	3,333	1,619	3,7	0,0	0,0	0,003123	0,003053
11	9	10	10	1	Closed	Line	NO	2,579	1,251	2,9	0,0	0,0	0,001277	0,000707
12	10	11	11	1	Closed	Line	NO	2,390	1,160	2,7	0,0	0,0	0,002505	0,002449
13	11	11	12	2	Closed	Line	NO	0,782	0,379	0,9	0,0	0,0	0,000154	0,000150
14	11	11	12	3	Closed	Line	NO	0,782	0,379	0,9	0,0	0,0	0,000154	0,000150

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area Nu
1	2	1	20,00	0,99949	19,990	-0,01	0,000	0,000	0,000	0,000	6,924	3,366	0,00	0,00
2	1	1	20,00	1,00000	20,000	0,00	0,000	0,060	0,060	0,000	0,000	0,00	0,00	
3	3	3	20,00	0,99939	19,988	-0,01	0,123	0,066	0,066	0,000	0,000	0,00	0,00	
4	5	5	20,00	0,99788	19,958	-0,04	0,136	0,066	0,066	0,000	0,000	0,00	0,00	
5	10	10	20,00	0,99506	19,901	-0,08	0,188	0,091	0,091	0,000	0,000	0,00	0,00	
6	4	4	20,00	0,99812	19,962	-0,03	0,315	0,153	0,153	0,000	0,000	0,00	0,00	
7	8	8	20,00	0,99668	19,934	-0,06	0,591	0,286	0,286	0,000	0,000	0,00	0,00	
8	9	9	20,00	0,99557	19,911	-0,08	0,751	0,364	0,364	0,000	0,000	0,00	0,00	
9	11	11	20,00	0,99382	19,876	-0,10	0,823	0,399	0,399	0,000	0,000	0,00	0,00	
10	6	6	20,00	0,99066	19,939	-0,06	1,176	0,570	0,570	0,000	0,000	0,00	0,00	
11	7	7	20,00	0,99719	19,944	-0,05	1,232	0,596	0,596	0,000	0,000	0,00	0,00	
12	12	12	20,00	0,99358	19,872	-0,11	1,564	0,758	0,758	0,000	0,000	0,00	0,00	

Imagen 7.3.1.4_03: Caso nº4 R datos obtenidos

7.3.1.3 Caso nº 7 R

El siguiente caso está caracterizado por los siguientes valores:



Imagen 7.3.1.3_01: Caso nº 7 R

Seguidamente se introduce el valor de generación y consumo en la hoja excel indicada en el apartado 4.4. Tras calcular los valores automáticamente como se muestra en la *Tabla 7.3.1.3_01*, se introducen en el archivo del Power World.

	Empresa suministradora ENDESA limita el factor de potencia en líneas de media tensión a un valor de ->	$FP = \cos(\varphi) = 0,90 = 25,84193276^\circ = 0,451026811 \text{ rad}$	INDUCTIVO	
MUNICIPIOS	LUGARES DE CONSUMO POR PUEBLOS	% DE LA POBLACIÓN SOBRE TODA LA ISLA	POTENCIA ACTIVA ESTIMADA [MW]	POTENCIA REACTIVA ESTIMADA [MVar]
Valverde	San Andrés	1,97	0,102	0,050
	Isora	3,63	0,189	0,091
	Las Playas	0,95	0,049	0,024
	Timijiraque	1,79	0,093	0,045
	Valverde	14,94	0,777	0,376
	Tamaduste	2,91	0,151	0,073
	Mocanal	8,56	0,445	0,216
	Guarazoca	2,95	0,154	0,074
	Resto municipio	7,93	0,412	0,200
Frontera	Las Puntas	2,73	0,142	0,069
	Tigaday	11,93	0,620	0,300
	Los Llanillos	2,65	0,138	0,067
	Sabinosa	2,12	0,110	0,054
	Resto municipio	17,89	0,930	0,451
El Pinar	Taibique	7,54	0,392	0,190
	Resto municipio	9,51	0,494	0,239
	TOTALES	100,00	5,200	2,518
INTRODUCIR VALORES DE REE	DEMANDA TOTAL DE LA ISLA EN UN INSTANTE DETERMINADO [MW]		5,200	5-2-19 10:10
	POTENCIA APARENTE TOTAL [MVA]		5,778	

Tabla 7.3.1.3_01: Consumos Caso nº 7 R

La simulación queda de la siguiente manera y los datos que se obtienen son los presentados en la Imagen 7.3.1.3_03.

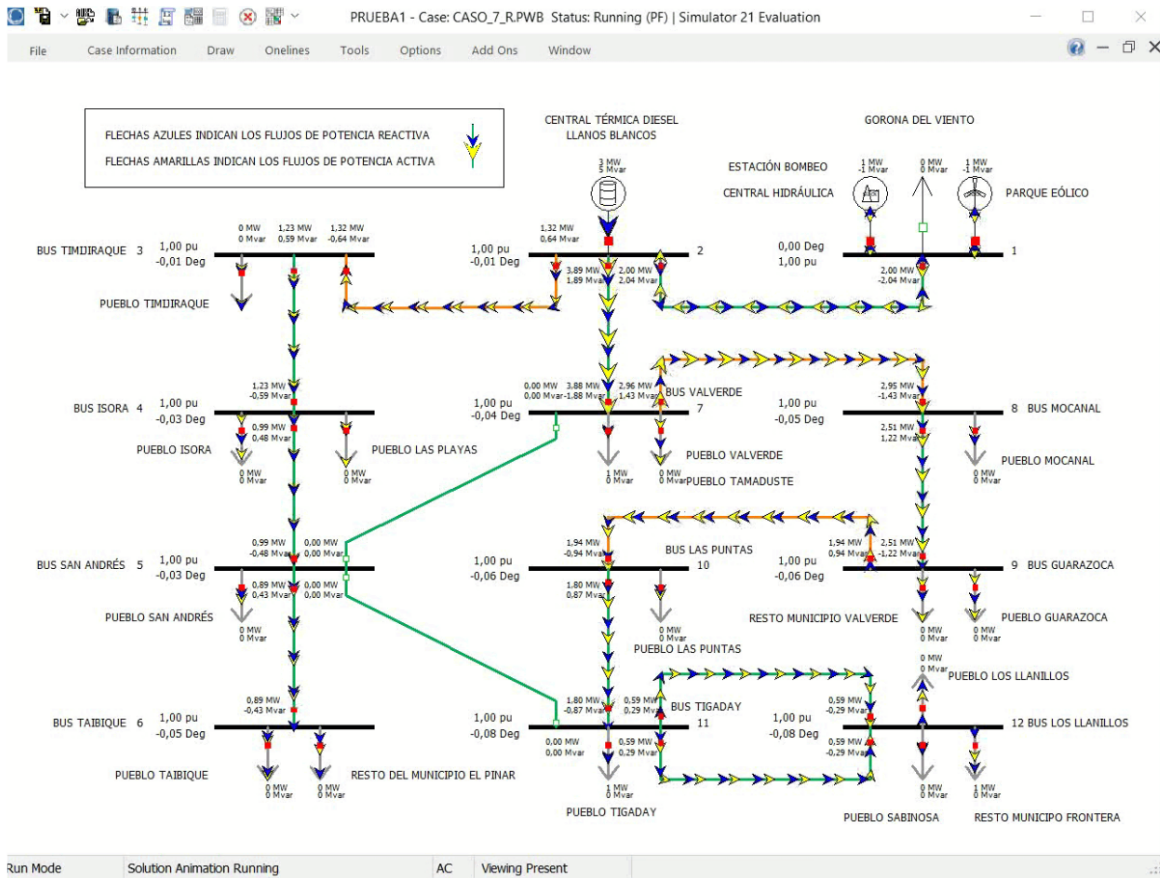


Imagen 7.3.1.3_02: Caso nº7 R simulación

Model Explorer: Branches State

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xtrmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss
1	2	11	1	1	Closed	Line	NO	-1,997	2,043	2,857	0,0	0,0	0,000406	0,000397
2	2	3	3	1	Closed	Line	NO	1,320	0,640	1,467	0,0	0,0	0,000597	0,000504
3	2	7	7	1	Closed	Line	NO	3,889	1,889	4,324	0,0	0,0	0,005632	0,005507
4	3	4	4	1	Closed	Line	NO	1,227	0,595	1,364	0,0	0,0	0,000981	0,000959
5	4	5	5	1	Closed	Line	NO	0,988	0,479	1,098	0,0	0,0	0,000152	0,000148
6	5	6	6	1	Closed	Line	NO	0,887	0,430	0,985	0,0	0,0	0,000513	0,000502
7	5	5	5	1	Open	Line	NO	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,000000	0,000000
8	5	11	11	1	Open	Line	NO	0,000	0,000	0,000	0,0	0,0	0,000000	0,000000
9	7	8	8	1	Closed	Line	NO	2,955	1,435	3,285	0,0	0,0	0,001112	0,000616
10	8	9	9	1	Closed	Line	NO	2,509	1,218	2,789	0,0	0,0	0,001766	0,001726
11	9	10	10	1	Closed	Line	NO	1,942	0,942	2,158	0,0	0,0	0,000722	0,000399
12	10	10	11	1	Closed	Line	NO	1,799	0,873	1,999	0,0	0,0	0,001415	0,001383
13	11	11	12	2	Closed	Line	NO	0,589	0,286	0,655	0,0	0,0	0,000087	0,000085
14	11	11	12	3	Closed	Line	NO	0,589	0,286	0,655	0,0	0,0	0,000087	0,000085

Model Explorer: Buses

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act B Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area Num
1	1	1	20,00	1,00000	20,000	0,00	0,000	0,000	1,998	-2,043	4,572	0,00	0,00	0,00
2	2	1	20,00	1,00000	20,000	-0,01	0,000	0,000	3,212	4,572	0,00	0,00	0,00	0,00
3	3	1	20,00	0,99992	19,998	-0,01	0,093	0,045	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	4	1	20,00	0,99897	19,979	-0,03	0,238	0,115	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	5	1	20,00	0,99879	19,976	-0,03	0,102	0,050	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	6	1	20,00	0,99810	19,962	-0,05	0,886	0,429	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	7	1	20,00	0,99827	19,965	-0,04	0,928	0,449	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	8	1	20,00	0,99789	19,958	-0,05	0,445	0,216	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	9	1	20,00	0,99705	19,941	-0,06	0,566	0,274	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	10	10	20,00	0,99667	19,933	-0,06	0,142	0,069	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	11	11	20,00	0,99573	19,915	-0,08	0,620	0,300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	12	12	20,00	0,99556	19,911	-0,08	1,178	0,572	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Imagen 7.3.1.3_03: Caso nº7 R datos obtenidos

7.4 Conclusiones globales de las 2 topologías

Las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo de la realización de todas las simulación se condensan en estos puntos que se describen a continuación:

- Se esperaba que las pérdidas fueran del orden de Megavatios y Megavoltio Amperios reactivos pero han sido de kilovatios y kilovoltio amperios reactivos obtenidos.
- En la Red radial se pierde más energía que en la Red mallada.
- La energía que se debe de generar tiene que ser la suma de la energía consumida y las pérdidas por transporte.
- Los casos de estudio donde más energía se pierde son el 4 y 5. Esto es debido a los altos consumos que tienen particularmente en ese momento.

Paralelamente se han sumado las pérdidas de energía en el transporte de cada caso y para las dos configuraciones tanto para red mallada como en radial. Los resultado obtenidos se muestran en la siguiente *Tabla 7.4_01*:

Nº DE CASO	PÉRDIDAS TOTALES DE LA RED			
	MALLADA		RADIAL	
	kW	kVAr	kW	kVAr
1	14,393	13,537	17,896	16,329
2	13,207	12,49		
3	9,414	8,9		
4	20,808	19,683	25,168	23,157
5	20,808	19,683		
6	14,58	13,734		
7	10,52	9,908	0,01297	0,011861
8	16,94	15,971		
9	14,932	14,063		

Tabla 7.4_01: Pérdidas totales de la red

Capítulo 8

8 Consumos máximos y mínimos instantáneos por mes de todo el año 2019

En este capítulo se analizan los consumos del año 2019 para empezar a poder determinar qué posibles características tiene que tener la central de pilas de combustible.

Tiempo de lectura 5 min aprox

Si se desea sustituir la generación diesel oil por las tecnologías del hidrógeno, es imprescindible conocer los consumos instantáneos mínimos y máximos de cada mes del año 2019. Es cierto que para hacer un dimensionado de las tecnologías del hidrógeno más exacto, se tendría que haber realizado este mismo estudio no solo del 2019 sino de al menos 5 o 10 años atrás. No obstante, para que no se excediera de las competencias del TFG, solo se ha realizado para el año en cuestión y así cumplir con los créditos marcados.

¿Qué es lo que se ha trabajado en esta apartado?. Simplemente se han recopilado los consumos instantáneos máximos y mínimos de los 365 días del año 2019 y se han filtrado estos resultados por cada mes. Ya que estos valores los proporciona Red Eléctrica Española en sus curvas de demanda, se ha podido elaborar la gráfica presente en la *Imagen 8_01*.

El consumo mínimo instantáneo y el consumo máximo instantáneo vienen determinados por las barras de color amarillo y rojo respectivamente. Las conclusiones que se pueden extraer son que para el mes con un consumo instantáneo máximo de 8,1 MW es en Agosto y el mínimo pertenece para el mes de noviembre por un valor de 1 MW. Esto significa que como mínimo, las pilas de combustible a instalar para sustituir en parte o completamente la central térmica de LLanos Blancos, deberían de poseer una potencia de 1 MW en adelante.

Del consumo máximo instantáneo de momento se va “a dejar en un lado” ya que hace falta obtener más información que se aportará en los siguientes pequeños estudios.

CONSUMOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS POR MES DE TODO EL AÑO 2019

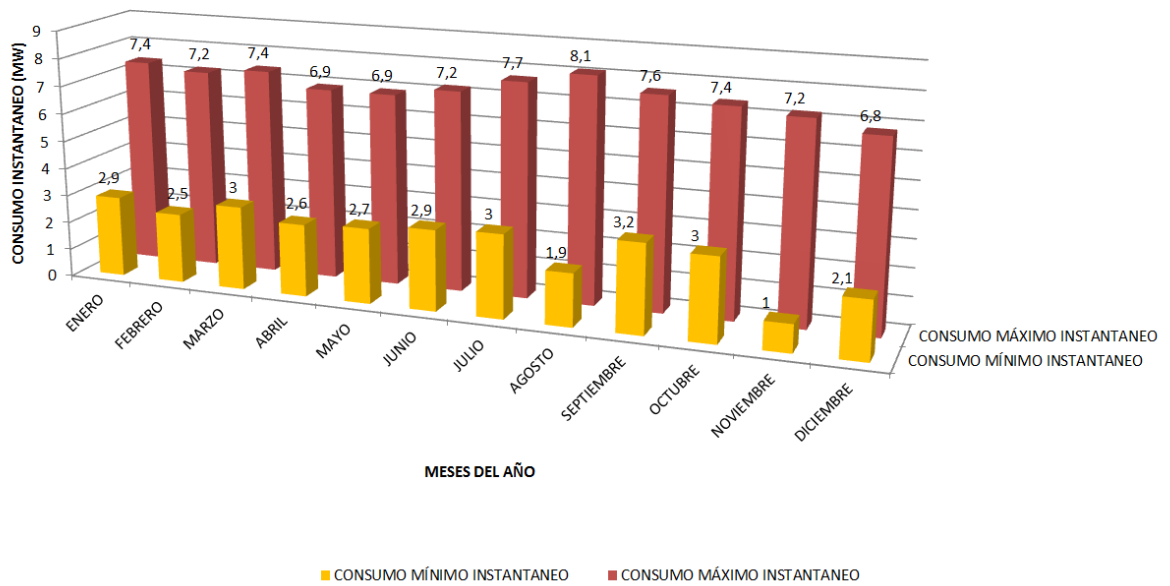


Imagen 8_01: Consumos máximos y mínimos por mes de todo el año 2019

Capítulo 9

9 Energía eólica disponible para el año 2019

En este capítulo se demuestra de forma directa a partir de que velocidad del viento, el parque eólico es capaz de suministrar suficiente energía como para autosustentarse por E.E.R.R.

Tiempo de lectura 10 min aprox

En este pequeño estudio, lo que se ha pretendido hacer ha sido, comparar los datos proporcionados por la web de Gorona del Viento con datos de Red Eléctrica Española. Más concretamente se ha comparado la velocidad media del viento y la energía generada de origen eólico para los 365 días del año 2019, con las gráficas de curva de demanda. La comparación ha permitido averiguar qué días, la isla ha sido capaz de generar su propia energía de forma autosuficiente solo con los recursos renovables.

Como se presenta en la gráfica de la *Imagen 9_01*, aproximadamente sobre 13,74 m/s de velocidad del viento como mínimo, dependiendo de si se tiene energía almacenada en la central hidráulica y si se bombea agua o no, se puede considerar que es una velocidad del viento suficiente para satisfacer el consumo de la Isla completamente por energías renovables. La línea naranja representa la franja a partir de la cual permite esta situación.

Si se analiza detalladamente, esa velocidad se alcanza muy pocas veces a lo largo del año. Este resultado obtenido da qué pensar y genera las siguientes reflexiones:

Como el emplazamiento del parque eólico está situado en una zona donde la velocidad media anual se encuentra entre 8,5 y 9,5 m/s, tiene sentido que en pocas ocasiones se alcancen los 13,74 m/s. Prácticamente es la velocidad del viento para que produzcan energía los aerogeneradores en régimen nominal. Por lo tanto, a simple vista parece que está sobredimensionado respecto al emplazamiento escogido.

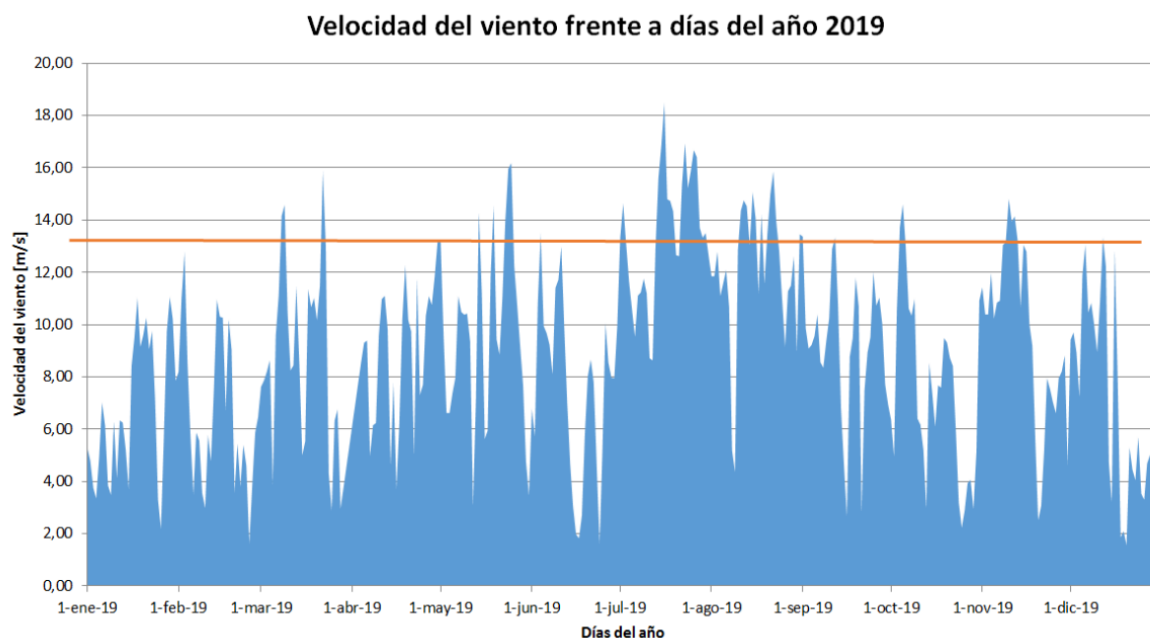


Imagen 9_01: Velocidad del viento frente a días del año 2019

Olvidando los últimos comentarios, hay que tener presente que los/las proyectistas que hayan llevado a cabo el parque eólico, habrán tenido muchos problemas debidos simplemente al plantear la instalación a modo de banco de pruebas (central hidráulica y parque eólico) y la dificultad de encontrar un emplazamiento donde no perjudiquen los espacios naturales protegidos.

Inicialmente, se creía antes de empezar a realizar este pequeño estudio, la posibilidad de que existiera energía de sobra, tanto como para electrolizar agua y poder producir hidrógeno in situ, pero no es así.

¿Como se ha obtenido el valor de 13,74 m/s? Se ha obtenido realizando un promedio comparando cuando se abastece por sí sola la isla y los valores de velocidad media para esos días. Como se muestran en la siguiente *Tabla 9_01*.

PROMEDIOS CUANDO LA ISLA NO ES CAPAZ DE ABASTECERSE DE FORMA RENOVABLE		PROMEDIOS CUANDO LA ISLA ES CAPAZ DE ABASTECERSE DE FORMA RENOVABLE	
Media Vel viento (m/s)	Gen. Eólica (MWh)	Media Vel viento (m/s)	Gen. Eólica (MWh)
7,97	77,614	13,74	183,957

Tabla 9_01: Promedios cuando la isla puede o no, abastecerse por sí sola

Lo más probable es que la misma potencia instalada en otro lugar de la Isla con una velocidad mayor del viento, hubiera permitido su completo abastecimiento.

Según el PDS-3_EOLICO: En el sector ET1, la parte más alta de la montaña entre la Fuga Calda y Lomo del Trébol, la velocidad media anual es de 11,5 m/s. Este espacio sería adecuado pero no se puede utilizar ya que es un medio natural protegido y de difícil acceso.

Por otro lado, la velocidad media del viento a lo largo del año 2019 del parque eólico es de 7,97 m/s. Es un valor cercano al del estudio del 2007 del gobierno de canarias PDS-3_EOLICO en el que indica que la velocidad media anual del viento está entre 8,5 y 9,5 m/s.

Tras realizar el análisis, las posibles soluciones o mejoras que se podrían implantar para tener más energía podrían ser:

- Sustituir los aerogeneradores existentes e instalar más aerogeneradores que trabajen a la velocidad media anual. Estos tendrían que tolerar las altas rafagas de viento puntuales a las que estarían sometidos.
- Emplazar los aerogeneradores existentes en otro lugar y aprovechar los lugares de la isla donde las velocidades del viento sean mayores.

Todo esto conllevaría estudios muy concretos y complejos que superan los objetivos del presente TFG.

Capítulo 10

10 Proporción de fuentes de energía para el año 2019 que abastecen el consumo eléctrico

En este capítulo se analizan qué fuentes de energía han estado presentes para la generación de energía, a lo largo de los 365 días del 2019. ¿Es El Hierro 100% renovable?

Tiempo de lectura 5 min aprox

¿En qué proporción de días del año, se reparte el origen de las fuentes de energía? Este pequeño estudio también relevante para el objeto del TFG, evoca una importante información. Usando datos de Red Eléctrica Española, se ha conseguido elaborar la siguiente gráfica de la *Imagen 10_01*.

PORCENTAJE DE DÍAS DEL AÑO 2019 EN EN EL QUE SU CONSUMO SE ABASTECE POR DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA

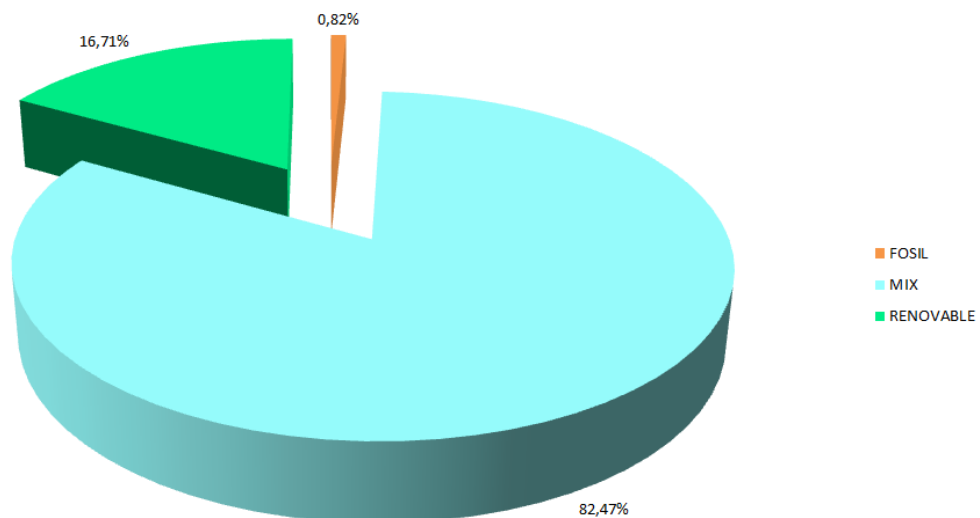


Imagen 10_01: Porcentaje de días del año según fuentes de energía

Para interpretar la gráfica hay que saber que el 100% significa los 365 días del año 2019. Luego, cada porcentaje y color determinan, por ejemplo, que el 82,47% de los días de todo el año 2019, la energía eléctrica ha provenido de un mix de fuentes de energía renovable. Lo mismo para el resto de porcentajes.

	DIAS
AÑO	365
FUENTE	DIAS
FOSIL	3
MIX	301
RENOVABLE	61
SUMATORIO OK	365
FUENTE	% DEL 2019
FOSIL	0,821917808
MIX	82,46575342
RENOVABLE	16,71232877
SUMATORIO OK	100

Tabla 10_01: Resumen datos proporción de fuentes de energía y días 2019

A modo de resumen, se presenta de elaboración propia, la *Tabla 10_01*.

Se observa que ciertos días donde la generación renovable satisface el consumo, a veces es necesario utilizar los motores diesel para arrancar la estación de bombeo y posteriormente el diesel se desconecta.

El sistema de almacenaje de energía (hidroeléctrica) no es capaz de proporcionar un día entero de energía, por lo que su uso se limita a cubrir consumos puntuales y a regular la curva de consumo diaria.

Solo el 16,71% de los días de todo el año 2019, la Isla es capaz de abastecerse puramente por energías renovables, lo cual entraña un gran reto el poder descarbonizar el SEP de la Isla.

Como se comentaba en los primeros capítulos, sólo se pudo abastecer a la isla completamente por E.E.R.R 61 días. De los cuales, pocas semanas, han sido seguidas. Estos días se focalizaron en el mes de Agosto.

Capítulo 11

11 Microcortes en el suministro y calidad de la energía eléctrica 2016-2019

En este capítulo se analizan la calidad del suministro de energía eléctrica, los cambios bruscos de recursos renovables y se estima de forma aproximada la energía para subsanar los microcortes.

Tiempo de lectura 15 min aprox

11.1 Consideraciones previas

Un microcorte es sinónimo de una interrupción corta con duración desde algunos milisegundos hasta segundos en el suministro de energía. Si el tiempo se encuentra entre los minutos y horas, se puede considerar apagón. Para conocer a groso modo la calidad del suministro energético de la isla, se han estudiado las curvas de demanda proporcionadas por Red Eléctrica Española durante los 365 días desde el 2016 hasta el 2019. ¿Por qué desde el 2016? Porque a esa fecha, la central de Gorona del viento ya estaba operativa tras su puesta en marcha y pruebas de funcionamiento, desde su montaje que empezó a construirse en el 2014. Algunos criterios y consideraciones previas a este pequeño estudio son:

- A partir del 2016 se considera plenamente su funcionamiento en la red de la isla.
- El objetivo es descubrir si la demanda de energía se satisface para toda la isla.
- Tras una previsualización de los 4 años, y observar como fluctúa la demanda de la isla en función de la generación.

- A lo largo de los 4 años aparecen muchos microcortes y bajadas de calidad del suministro eléctrico, pero solo se estudiarán los más relevantes (2 casos por año).
- Los cálculos realizados se han basado en los consumos instantáneos medios y en la diferencia de los consumos previstos y reales.
- Los criterios han sido: la larga duración en el tiempo y el dejar a toda la isla sin suministro.
- Todos los fenómenos ocurridos con las siguientes características se han despreciado: corta duración en el tiempo y dejar parcialmente a la isla sin suministro.

En los siguientes apartados se desarrolla el pequeño estudio mencionado.

11.2 Microcortes en el año 2019

En base a los criterios definidos inicialmente, en este año solo ha aparecido un caso destacable. Los círculos azules, señalan el cambio brusco de la generación renovable para el día 12/11/19.



Imagen 11.2_01: Microcortes 2019

11.3 Microcortes en el año 2018

En este año se han seleccionado los 2 casos más representativos, donde se puede observar que cae en picado la generación y se intenta subsanar con los grupos generadores diesel.



Imagen 11.3_01: Microcortes 1 2018



Imagen 11.3_02: Microcortes 2 2018

11.4 Microcortes en el año 2017

Más ejemplos de la inconstancia de las renovables y de la forma de operar para intentar cubrir la demanda, aunque a simple vista parece que no llega a proporcionar energía de forma adecuada.



Imagen 11.4_01: Microcortes 1 2017



Imagen 11.4_02: Microcortes 2 2017

11.5 Microcortes en el año 2016

Estos casos quizás sean los más representativos. Se observa que el periodo de estos fenómenos en el que se intenta llegar a cubrir la demanda tienen una inercia muy alta en el tiempo.



Imagen 11.5_01: Microcortes 2 2016



Imagen 11.5_02: Microcortes 2 2016

11.6 Conclusiones obtenidas

Las conclusiones obtenidas vienen descritas a continuación junto a los valores calculados en la *Tabla 11.6_01*.

T. CORTE [minutos]	112,7272727
PROMEDIO	
	ENERGÍA FALTANTE [MWh]
08/05/2019	0,578
12/11/2019	3,262
12/11/2019	-0,181
12/11/2019	0,288
28/02/2018	0,200
23/02/2018	0,238
09/08/2017	5,584
11/09/2017	0,656
18/02/2016	6,316
18/02/2016	2,525
18/02/2016	6,697
PROMEDIO	2,378

Tabla 11.6_01: Duración y energía de los casos estudiados

- En un principio se esperaba que los cortes a cero del suministro fueran por paradas de mantenimiento en las centrales generadoras, pero no ha sido así.
- El motivo de los cortes a cero ha sido el cambio brusco y repentino de los recursos renovables. Si de repente deja de haber viento, el control de operación de la isla, intenta responder frente a esta situación.
- Este tiempo de suministro tiene una media entre los 7 casos a estudiar de 112,727 minutos.
- La energía media que ha faltado para garantizar la calidad de suministro eléctrico a sido de 2,378 MWh
- La isla tiene una falta de capacidad generadora y de almacenaje de energía para garantizar el suministro eléctrico.

Otro dato importante para el hipotético dimensionado de la central de pilas de combustible es el valor de la energía de 2,38 MWh. En el estudio anterior de consumos máximos y mínimos se obtuvo el valor mínimo de energía si fuera suministrado por una hora de 1 MWh. Ahora se ha averiguado que para garantizar el suministro de energía frente a los cambios variables de los recursos renovables se necesitan 2,38 MWh.

Los grupos generadores diesel oil, su tiempo de puesta en marcha no será mucho, por lo observado en las gráficas suelen ser de 30, 60 minutos. En cambio si fueran pilas de combustible, su puesta en marcha se reduciría a segundo o como mucho a 10 - 15 minutos. Este es otro motivo por el cual apostar por las tecnologías del hidrógeno.

El valor negativo de la *Tabla 11.6_01* es debido a uno de los criterios iniciales, como para su cálculo se ha realizado con la diferencia de los consumos previstos y reales, como el real ha sido mayor que el previsto y sale negativo. Los valores de la tabla son orientativos, solo pretenden dar un orden de magnitud.

Capítulo 12

12 Legislación referente a la calidad de suministro eléctrico

En este capítulo se hace referencia a la legislación con relación directa a la calidad de suministro eléctrico en el territorio Español. ¿Conoces los indicadores TIEPI y NIEPI?

Tiempo de lectura 15 min aprox

La legislación referente a la calidad de suministro eléctrico, viene recogida en las siguientes tablas donde se han resumido los aspectos más importantes. Para no ser muy extenso en este apartado, solo se hablará de 1 ley y 2 reales decretos relacionados con el tema.

Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.
CAPÍTULO II Calidad suministro eléctrico
Artículo 51
<ul style="list-style-type: none"> ● Parámetros importantes: Continuidad, al número y duración de las interrupciones, así como a la calidad. ● El suministro de energía eléctrica deberá ser realizado por las empresas con las características y continuidad que reglamentariamente por el Gobierno se determinen para el territorio español. ● Si la baja calidad de la distribución de una zona es continua, o pudiera producir consecuencias graves para los usuarios, o concurrieran circunstancias especiales que puedan poner en peligro la seguridad en el servicio eléctrico, la Administración General del Estado requerirá que los planes de inversiones presentados por dichas empresas presenten actuaciones que impulsen la mejora de la calidad de servicio en dicha zonas.

Artículo 52

- El suministro de energía eléctrica a los consumidores podrá suspenderse cuando conste dicha posibilidad en el contrato de suministro o de acceso que nunca podrá invocar problemas de orden técnico o económico que lo dificulten, en las condiciones que reglamentariamente se establezcan.
- También podrá suspenderse temporalmente cuando ello sea imprescindible para el mantenimiento, reparación de instalaciones o mejora del servicio o por razones de seguridad del suministro.
- En ningún caso podrá suspenderse el suministro de energía eléctrica a aquellas instalaciones cuyos servicios hayan sido declarados como esenciales de conformidad con esta ley

Tabla 12_01: Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico

Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.

CAPÍTULO II Calidad de servicio

Artículo 100

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Interrupción de alimentación: condición en la que la tensión en los puntos de suministro no supera el 10 por 100 de la tensión declarada. Las interrupciones pueden ser largas, de duración superior a tres minutos, o breves, de duración inferior o igual a tres minutos. El Ministerio de Economía, en función de la evolución de la tecnología, podrá modificar el valor máximo del tiempo hasta el cual una interrupción puede ser clasificada como breve | <ul style="list-style-type: none"> • TIEPI: es el tiempo de interrupción equivalente de la potencia instalada en media tensión ($1 \text{ kV} < V \leq 36 \text{ kV}$). • Las interrupciones que se considerarán en el cálculo del TIEPI serán las de duración superior a tres minutos. • NIEPI: es el número de interrupciones equivalente de la potencia instalada en media tensión ($1 \text{ kV} < V \leq 36 \text{ kV}$). • Las interrupciones que se considerarán en el cálculo del NIEPI serán las de duración superior a tres minutos. |
|--|--|

Tabla 12_02: Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre

Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.																							
CAPÍTULO II Calidad de servicio																							
Artículo 102		Artículo 104																					
<ul style="list-style-type: none"> Para la determinación de los aspectos de la calidad del producto se seguirán los criterios establecidos en la norma UNE-EN 50.160. 		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Número de horas</th> <th>Número de interrupciones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Zona urbana</td> <td>3,5</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>Zona semiurbana</td> <td>7</td> <td>11</td> </tr> <tr> <td>Zona rural concentrada</td> <td>11</td> <td>14</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Número de horas</th> <th>Número de interrupciones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Zona rural dispersa</td> <td>15</td> <td>19</td> </tr> </tbody> </table>			Número de horas	Número de interrupciones	Zona urbana	3,5	7	Zona semiurbana	7	11	Zona rural concentrada	11	14		Número de horas	Número de interrupciones	Zona rural dispersa	15	19		
	Número de horas	Número de interrupciones																					
Zona urbana	3,5	7																					
Zona semiurbana	7	11																					
Zona rural concentrada	11	14																					
	Número de horas	Número de interrupciones																					
Zona rural dispersa	15	19																					
Artículo 106																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>TIEPI (Horas)</th> <th>Percentil 80 del TIEPI (Horas)</th> <th>NIEPI (Número)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Zona urbana</td> <td>1,5</td> <td>2,5</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Zona semiurbana</td> <td>3,5</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Zona rural concentrada</td> <td>6</td> <td>10</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Zona rural dispersa</td> <td>9</td> <td>15</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table> <p>Ningún municipio deberá superar el valor del percentil 80 del TIEPI durante más de dos años consecutivos.</p>					TIEPI (Horas)	Percentil 80 del TIEPI (Horas)	NIEPI (Número)	Zona urbana	1,5	2,5	3	Zona semiurbana	3,5	5	5	Zona rural concentrada	6	10	8	Zona rural dispersa	9	15	12
	TIEPI (Horas)	Percentil 80 del TIEPI (Horas)	NIEPI (Número)																				
Zona urbana	1,5	2,5	3																				
Zona semiurbana	3,5	5	5																				
Zona rural concentrada	6	10	8																				
Zona rural dispersa	9	15	12																				

Tabla 12_03: Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre

Para este apartado sería muy interesante poder calcular los valores del TIEPI y NIEPI ya que se podría comprobar si el SEP de la isla cumple con la normativa mencionada anteriormente. Debido a que para poder calcular estos valores hacen falta datos que son confidenciales, es decir, no son de dominio público, no se han calculado, no obstante a continuación se mencionan las expresiones tal cual está en la legislación:

$$\text{TIEPI} = \frac{\sum_{i=1}^k (P_i \times H_i)}{\sum P_i}$$

Donde:

ΣP_i = suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).

P_i = potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción «i» de duración H_i (en kVA).

H_i = tiempo de interrupción del suministro que afecta a la potencia P_i (en horas).

K = número total de interrupciones durante el período considerado.

$$\text{NIEPI} = \frac{\sum_{i=1}^k \text{PI}_i}{\sum \text{PI}}$$

Donde:

ΣPI = suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).

PI_i = potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción «i» (en kVA).

K = número total de interrupciones durante el período considerado.

Capítulo 13

13 Cuantificación de la energía de origen fósil para su sustitución por hidrógeno

En este capítulo se va a tratar de determinar de forma aproximada un valor de energía media, que en posteriores capítulos, permitirá saber la cantidad de hidrógeno que hace falta como vector energético.

Tiempo de lectura 15 min aprox

13.1 Criterios previos

Este apartado, quizás es de los más importante a la hora de poder descarbonizar el SEP de la isla. Para ello se han determinado una serie de criterios para cuantificar la energía de origen fósil a sustituir por hidrógeno.

- Con este estudio se pretende obtener la generación instantánea promedio mensual de origen diesel - oil.
- El primer criterio se ha basado en el estudio de generación instantánea máxima y mínima realizado anteriormente.
- Como realizar el promedio mensual de generación instantánea de todos los días del año (Datos cada 10 min), al ser un volumen de trabajo que excedería las horas de dedicación correspondientes a la realización del presente TFG, sólo se estudiará los 3 meses más significativos del 2019.
- Los 3 meses seleccionados son marzo, agosto y diciembre del 2019.

- Inicialmente se solicitó una instancia de datos públicos a Red Eléctrica, a la Gorona del Viento y a Endesa.
- Si se hubieran obtenido los datos más exactos, los resultados del estudio serían más reales, a pesar de ello, se ha realizado el estudio lo más riguroso que se ha permitido en el momento de su realización.
- Los resultados porcentuales se han obtenido de forma diferente para comprobar si el resultado es el mismo o parecido.
- Los valores negativos (consumo instantáneo de bombeo) proporcionado por la web de Red Eléctrica de generación hidráulica, se han sustituido por valores de 0 ya que no se necesita el consumo, sino la generación hidráulica instantánea.
- Existen momentos de varios días en los que Red Eléctrica no proporciona la generación instantánea, por lo que los cálculos automáticos de excel aparece #¡DIV/0!

13.2 Generación instantánea promedio mensual, marzo del 2019

Los datos obtenidos para este mes son:

Fecha	Promedios diarios						
	Generación inst (MW)			Porcentajes (%)			
	Motores diésel	Eólica	Hidráulica	Motores diésel	Eólica	Hidráulica	
01/03/2019	3,6	2,1	0,0	63,6	36,4	0,0	
02/03/2019	3,4	2,8	0,1	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
03/03/2019	3,0	3,0	0,1	51,2	47,6	1,2	
04/03/2019	3,0	4,1	0,2	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
05/03/2019	4,7	0,2	0,5	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
06/03/2019	3,1	3,5	0,1	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
07/03/2019	1,6	6,9	0,0	19,4	80,6	0,0	
08/03/2019	0,4	8,2	0,0	5,1	94,9	0,0	
09/03/2019	0,0	8,7	0,0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
10/03/2019	0,7	5,3	0,9	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
11/03/2019	2,1	4,2	0,5	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
12/03/2019	2,0	3,9	0,8	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
13/03/2019	1,4	6,5	0,1	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
14/03/2019	2,4	3,1	0,7	40,4	47,4	12,2	
15/03/2019	3,6	1,1	0,7	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
16/03/2019	3,3	1,2	0,7	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
17/03/2019	1,5	7,3	0,0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
18/03/2019	1,4	6,4	0,0	18,4	81,5	0,1	
19/03/2019	1,4	6,7	0,0	18,0	82,0	0,0	
20/03/2019	1,5	5,8	0,1	20,7	77,0	2,3	
21/03/2019	0,0	7,3	0,1	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
22/03/2019	0,0	8,6	0,0	0,0	100,0	0,0	
23/03/2019	0,0	7,3	0,0	0,0	99,2	0,8	
24/03/2019	2,8	1,2	1,1	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
25/03/2019	4,5	0,1	0,5	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
26/03/2019	3,8	1,3	0,7	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
27/03/2019	3,6	1,7	0,3	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
28/03/2019	4,2	0,2	0,4	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
29/03/2019	4,9	0,1	0,2	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
30/03/2019	3,9	1,1	0,0	78,4	21,6	0,0	
31/03/2019	4,2	0,9	0,0	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	
PROMEDIO MENSUAL	2,5	3,9	0,3	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!

Tabla 13.2_01: Generación instantánea promedio mensual, marzo del 2019

GENERACIÓN INSTANTÁNEA PROMEDIO MENSUAL MARZO 2019

■ DIESEL - OIL 2,5 [MW] ■ HIDRÁULICA 0,3 [MW] ■ EÓLICA 3,9 [MW]

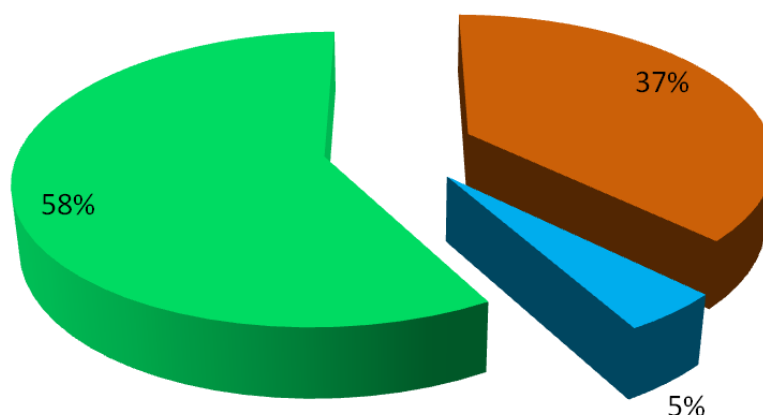


Imagen 13.2_01: Generación instantánea promedio mensual marzo 2019

13.3 Generación instantánea promedio mensual, agosto del 2019

Los datos obtenidos para este mes son:

Fecha	Promedios diarios					
	Generación inst (MW)			Porcentajes (%)		
	Motores diésel	Eólica	Hidráulica	Motores diésel	Eólica	Hidráulica
01/08/2019	0,0	6,4	0,0	0,0	100,0	0,0
02/08/2019	0,0	6,5	0,6	0,0	89,9	10,1
03/08/2019	0,0	7,6	0,0	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!
04/08/2019	0,0	6,1	0,2	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!
05/08/2019	0,0	7,0	0,1	0,0	98,6	1,4
06/08/2019	0,0	7,0	0,2	0,0	96,9	3,1
07/08/2019	0,8	6,0	0,4	10,7	82,3	7,0
08/08/2019	2,6	2,1	1,8	41,6	29,4	29,0
09/08/2019	4,3	1,1	0,6	74,5	15,8	9,6
10/08/2019	1,4	7,0	0,0	16,4	83,6	0,0
11/08/2019	1,3	6,7	0,0	16,6	83,4	0,0
12/08/2019	0,0	7,5	0,0	0,1	99,9	0,0
13/08/2019	0,0	7,7	0,0	0,0	100,0	0,0
14/08/2019	0,0	7,7	0,0	0,0	100,0	0,0
15/08/2019	0,0	7,5	0,0	0,0	100,0	0,0
16/08/2019	0,0	6,5	0,6	0,0	91,3	8,7
17/08/2019	2,0	5,1	0,6	26,4	63,3	10,2
18/08/2019	1,4	5,9	0,1	21,2	76,0	2,9
19/08/2019	2,2	5,0	0,3	29,6	65,6	4,8
20/08/2019	1,3	7,3	0,0	15,6	84,4	0,0
21/08/2019	0,0	7,7	0,0	0,1	99,9	0,0
22/08/2019	0,0	8,1	0,0	0,0	100,0	0,0
23/08/2019	0,0	7,7	0,6	0,0	90,9	9,1
24/08/2019	0,9	6,4	0,9	10,2	76,7	13,0
25/08/2019	1,6	5,3	0,0	32,5	67,1	0,4
26/08/2019	3,1	4,0	0,3	47,8	46,9	5,2
27/08/2019	1,5	6,1	0,0	23,0	77,0	0,0
28/08/2019	1,9	5,9	0,5	23,1	70,0	6,8
29/08/2019	1,3	6,8	0,2	16,5	80,8	2,7
30/08/2019	3,2	3,4	0,9	45,7	40,7	13,6
31/08/2019	1,4	6,9	0,4	16,6	77,2	6,3
PROMEDIO MENSUAL	1,0	6,2	0,3	#iDIV/0!	#iDIV/0!	#iDIV/0!

Tabla 13.3_01: Generación instantánea promedio mensual, agosto del 2019

GENERACIÓN INSTANTÁNEA PROMEDIO MENSUAL AGOSTO 2019

■ DIESEL - OIL 1,0 [MW] ■ HIDRÁULICA 0,3 [MW] ■ EÓLICA 6,2 [MW]

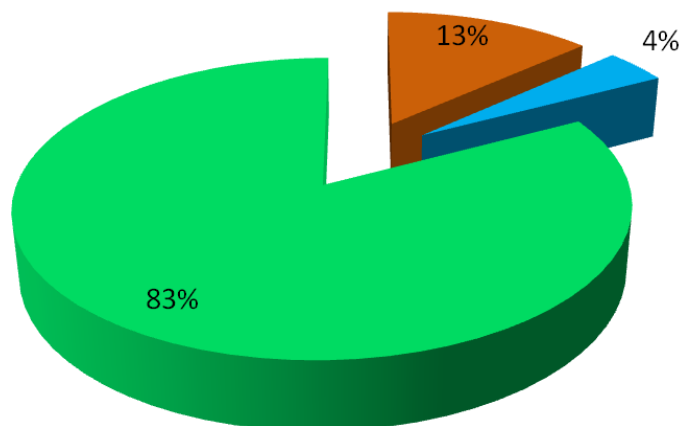


Imagen 13.3_01: Generación instantánea promedio mensual agosto 2019

13.4 Generación instantánea promedio mensual, diciembre del 2019

Los datos obtenidos para este mes son:

Fecha	Promedios diarios						
	Generación inst (MW)			Porcentajes (%)			
	Motores diésel	Eólica	Hidráulica	Motores diésel	Eólica	Hidráulica	
01/12/2019	1,6	4,6	0,1	25,6	72,3	2,1	
02/12/2019	3,9	2,3	0,0	67,9	32,0	0,0	
03/12/2019	3,9	1,7	0,1	70,7	28,0	1,3	
04/12/2019	4,1	0,6	0,1	83,2	13,7	3,2	
05/12/2019	1,6	5,5	0,0	22,7	77,0	0,2	
06/12/2019	0,0	6,9	0,0	0,1	99,9	0,0	
07/12/2019	0,9	5,8	0,0	12,5	87,5	0,1	
08/12/2019	0,9	5,5	0,2	13,0	83,4	3,6	
09/12/2019	0,9	4,7	0,1	15,3	81,7	3,0	
10/12/2019	1,5	3,6	0,5	27,8	63,1	9,1	
11/12/2019	1,3	5,6	0,1	19,8	78,2	2,0	
12/12/2019	0,6	7,8	0,0	6,6	93,4	0,0	
13/12/2019	0,0	6,4	0,2	0,1	94,4	5,5	
14/12/2019	3,4	0,7	0,3	78,3	14,1	7,6	
15/12/2019	3,7	0,1	0,4	87,6	2,1	10,3	
16/12/2019	2,9	3,0	0,1	54,4	43,6	2,0	
17/12/2019	3,2	2,1	0,2	60,5	35,8	3,7	
18/12/2019	4,2	0,0	0,5	89,2	0,1	10,7	
19/12/2019	4,6	0,0	0,2	95,3	0,5	4,1	
20/12/2019	4,2	0,0	0,4	90,3	0,1	9,6	
21/12/2019	3,3	1,5	0,3	70,8	21,8	7,4	
22/12/2019	3,9	0,8	0,2	80,2	14,1	5,7	
23/12/2019	4,6	0,3	0,0	92,4	6,9	0,7	
24/12/2019	3,8	1,6	0,1	72,1	26,2	1,7	
25/12/2019	3,9	0,4	0,0	92,5	7,4	0,1	
26/12/2019	4,2	0,1	0,1	94,7	2,6	2,7	
27/12/2019	4,4	0,5	0,0	88,4	10,5	1,1	
28/12/2019	4,2	0,6	0,0	86,9	12,6	0,5	
29/12/2019	3,9	0,6	0,1	84,3	14,6	1,0	
30/12/2019	4,3	0,3	0,0	92,3	6,8	0,9	
31/12/2019	4,8	0,0	0,1	99,0	0,1	0,9	
PROMEDIO MENSUAL	3,0	2,4	0,2	60,5	36,3	3,3	100,0

Tabla 13.2_01: Generación instantánea promedio mensual, diciembre del 2019

GENERACIÓN INSTANTÁNEA PROMEDIO MENSUAL DICIEMBRE 2019

■ DIESEL - OIL 3,0 [MW] ■ HIDRÁULICA 0,2 [MW] ■ EÓLICA 2,4 [MW]

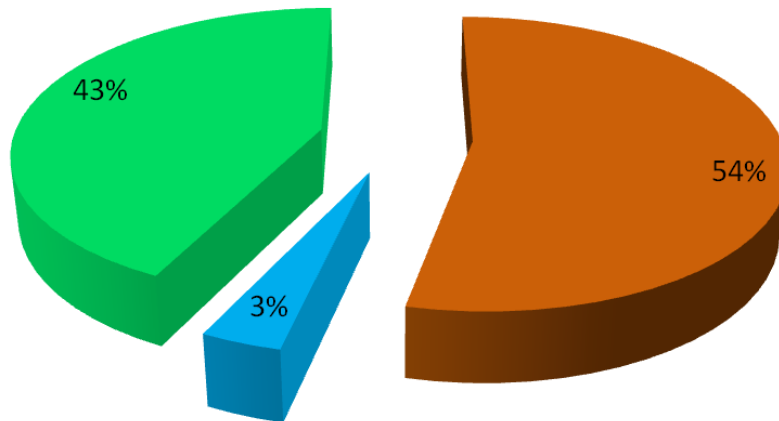


Imagen 13.4_01: Generación instantánea promedio mensual diciembre 2019

13.5 Conclusiones obtenidas

A parte de las conclusiones a las que se ha llegado descritas a continuación, resaltar que la generación eólica instantánea promedio mensual mayor, ocurre en agosto.

- Por los datos obtenidos, marzo es un mes intermedio por tener una generación por diesel-oil media respecto a todo el año 2019.
- Por los datos obtenidos, agosto es un mes favorable por tener una generación por diesel-oil baja respecto a todo el año 2019.
- Por los datos obtenidos, diciembre es un mes desfavorable por tener una generación por diesel-oil alta respecto a todo el año 2019.
- Para el dimensionado (teórico) de la central eléctrica de pilas de combustible de hidrógeno se basará en la sustitución de la generación instantánea media mensual más grande de origen fósil. En este caso corresponde a los resultados del mes de diciembre del 2019.

13.6 Cálculos de energía aproximados

En función de los apartados 13.4, 11, 10, 9, 8 y 7.4, se puede decir, que la potencia mínima instalada para la sustitución de los grupos generadores diesel oil debe de ser de 3 MW. Si a continuación decidimos saber cuánta energía al día se podría producir, entonces se multiplica el valor de 3 MW por las 24 horas de un día. Así se obtienen 72 MWh/día.

Si se determina que la central de pilas de combustible debería de proporcionar energía por al menos 1 mes, se debería de producir 2.160 MWh/mes. ¿Por qué un mes?. Se da el supuesto de que el barco que traiga el hidrógeno a la isla llegará 1 vez por mes.

2,160 GWh es mucha energía, una energía promedio que se tiene que ir suministrando día a día para satisfacer las necesidades de la isla. Este valor ofrece un orden de magnitud de la gran cantidad de energía que se debería de almacenar y que a día de hoy es muy difícil de hacerlo haciendo uso de baterías.

Por si esto fuera poco, se tiene que tener en cuenta que los rendimientos de las pilas de combustible de megavatios de potencia, los fabricantes proporcionan un valor de eficiencia de alrededor del 60%. Esto significa que para obtener 2,16 GWh se necesitarían 3,6 GWh reales a almacenar.

¿Como se va a conseguir esto? En los siguientes apartados se tratará de estudiar las tecnologías más maduras para poder almacenar 3,6 GWh de energía en forma de hidrógeno y las pilas de combustible para transformar ese hidrógeno en energía eléctrica.

Capítulo 14

14 Almacenamiento de hidrógeno

¿Cuál es el coste del hidrógeno? y, ¿Cuanto hay que almacenar para descarbonizar el SEP de la isla? A estas y más preguntas se dará respuesta en el capítulo presente.

Tiempo de lectura 20 min aprox

14.1 Estado del arte en almacenamiento de hidrógeno

¿Cual es el conocimiento acumulado referente a esta tecnología?. Los métodos de almacenamiento del hidrógeno que se muestran seguidamente, son cada cual más prometedor que el anterior. El problema es que aún siguen en fase de investigación, por lo tanto las tecnologías más extendidas se verán en los siguientes puntos. A continuación se exponen y nombran los siguientes métodos:

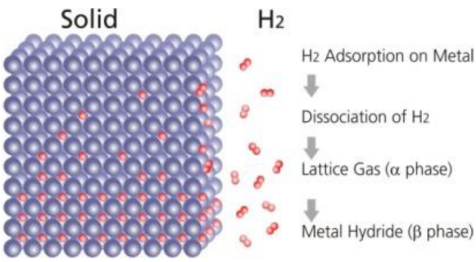
HIDRUROS METÁLICOS	DESCRIPCIÓN
	<p>Depósitos que contienen compuestos metálicos que forman redes cristalinas y que pueden absorber átomos de hidrógeno en sus intersticios almacenando una cantidad de hidrógeno en función de la presión y temperatura.</p>
<p style="text-align: center;">VENTAJAS</p>	<p style="text-align: center;">INCONVENIENTES</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● Sistema de almacenamiento y manipulación segura. ● Ofrece una alta capacidad de almacenamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se rompen en finas partículas después de repetidas liberaciones de hidrógeno. ● Son sensibles a las impurezas como el oxígeno y el monóxido de carbono. ● El coste es mayor que en el hidrógeno comprimido. ● Elevado peso de los equipos.

Tabla 14.1_01: Hidruros metálicos

Otras formas de almacenar hidrógeno, pero que no tiene mucho sentido en este TFG porque no son capaces de alcanzar las características de los hidruros metálicos son los lodos de hidrógeno, los nanotubos de carbono, los fulerenos, las zeolitas y microesferas de vidrio.

14.2 Dimensionado teórico del almacenamiento

¿Cuál debe ser el volumen de los depósitos para almacenar hidrógeno? Esta es la pregunta a la que se le va a dar respuesta en los siguientes apartados. Los métodos de almacenamiento que se van a tratar serán el gas hidrógeno almacenado en depósitos a 700 bares y el hidrógeno líquido. Finalmente se realizará una comparativa con los depósitos que se necesitarán si se almacena la misma energía en forma de diesel oil.

14.2.1 Gas hidrógeno a 700 bar

Antes de empezar a obtener resultados, se tiene que explicar para el gas hidrógeno qué unidad se emplea. El normal metro cúbico, es una unidad de volumen de un gas no condensable a 0 °C y a 1,013 bar de presión. Al no disponer de agua, su humedad relativa es del 0%. La fórmula incluye una "N" escrita delante indicando su condición de normal.

Con esta aclaración presente, se va a obtener la cantidad de hidrógeno en Nm³ que contenga la energía de 3,6 GWh. Para ello haciendo uso de la tabla de equivalencias proporcionada por la web de la Asociación Española del Hidrógeno, se obtendrán los Nm³.

Masa H2 (kg)	↔	H2 gas (Nm3)	↔	H2 líquido1 (litros)	↔	Energía2 (MJ)	↔	Energía2 (kW·h)
1	=	11,12	=	14,12	=	120	=	33,33
0,0899	=	1	=	1,270	=	10,8	=	3,00
0,0708	=	0,788	=	1	=	8,495	=	2,359
0,00833	=	0,0926	=	0,1177	=	1	=	0,278
0,0300	=	0,333	=	0,424	=	3,6	=	1

1 El hidrógeno es líquido a presión atmosférica por debajo de 20,39 K
2 Basado en poder calorífico inferior

Tabla 14.2.1_01: Equivalencias hidrógeno AeH2

Sabiendo que 1 kWh equivale a 0,333 Nm³ de H₂ según la Tabla 14.2.1_01.

$$\frac{3,6 \cdot 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot 0,333 \text{ Nm}^3}{1 \text{ kW} \cdot \text{h}} = 1.198.800 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 (101.325 [\text{Pa}] \text{ y } 273,15 [\text{K}])$$

Por tanto hacen falta 1.198.800 Nm³ de H₂ y como conclusión es inviable almacenar el hidrógeno en condiciones STP.

A continuación se va a obtener el volumen necesario del depósito para almacenar el H_2 a una presión de 700 bar. Para ello se necesita conocer su factor de compresión ya que a esta elevada presión el gas no se puede considerar como ideal.

¿Como se obtiene este factor? Se puede obtener de la tabla de factores de compresibilidad proporcionada por la Asociación Española del Hidrógeno o haciendo uso del diagrama de compresibilidad para el hidrógeno obtenido del artículo publicado en Researchgate en Julio del 2016 llamado "Hydrogen storage and compression" por Sofoklis Makridis que se puede obtener el en siguiente enlace <https://www.researchgate.net/publication/313704619>.

Presión (Bar)	1	50	100	150	200	250	300	350
Factor de compresión	1	1,032	1,065	1,089	1,132	1,166	1,201	1,236
Presión (Bar)	400	500	600	700	800	900	1000	
Factor de compresión	1,272	1,344	1,416	1,489	1,560	1,632	1,702	

Ejemplo de aplicación del factor de compresibilidad: 1 botella (de las convencionales) de 50 litros a 200 bar de hidrógeno contiene a 0°C: $0,050 \text{ m}^3 \cdot 200 / 1,132 = 8,834 \text{ Nm}^3$

Tabla 14.2.1_02: Factores de compresibilidad AeH2

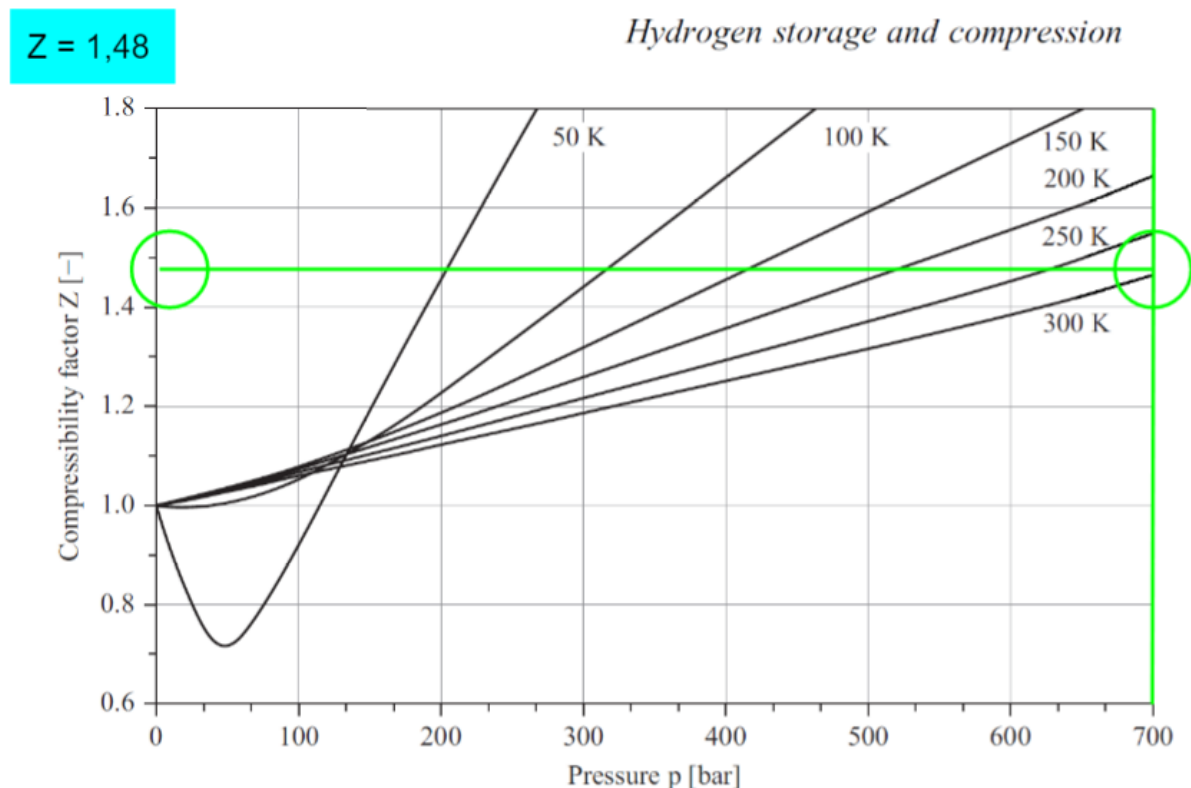


Imagen 14.2.1_01: Diagrama de compresibilidad para el H_2

Como se puede observar tanto para la tabla *Tabla 14.2.1_02* como en la *Tabla 14.2.1_03* se obtiene el mismo valor de $Z = 1,48$.

Seguidamente se hace uso de la ecuación generalizada de los gases. Con ello se obtendrá el volumen molar que ocupa el gas y, por tanto, el volumen de depósito necesario.

$$P \cdot V_m = Z \cdot R \cdot T$$

$P \rightarrow$ Presión [Pa]
 $V_m \rightarrow$ Volumen molar [m³/mol]
 $Z \rightarrow$ Factor de compresibilidad
 $R \rightarrow$ Constante de los gases [J/mol·K]
 $T \rightarrow$ Temperatura [K]

$$V_m = \frac{Z \cdot R \cdot T}{P} = \frac{1,489 \cdot 8,31 \cdot 298,15}{7 \cdot 10^7} ; V_m = 0,00005270 \frac{m^3}{mol}$$

$$V_m = 1.000 \cdot 0,00005270 ; V_m = 0,05270 \frac{L}{mol}$$

Empleando la ecuación generalizada en las condiciones STP se obtiene n.

$$n = \frac{101.325 \cdot 1.198.800}{1 \cdot 8,31 \cdot 273,15} ; n = 53,52 \cdot 10^6 \text{ mol H}_2$$

$$V_{deposito} = 0,05270 \frac{L}{mol} \cdot 53,52 \cdot 10^6 \text{ mol} = \frac{0,05270 \cdot 35,94 \cdot 10^6}{1.000} ;$$

$$V_{deposito} = 2.821 \text{ m}^3$$

Finalmente se obtiene como resultado un depósito de 2.821 m³.

14.2.2 Hidrógeno líquido

Como se ha visto en el apartado anterior, para almacenar gas hidrógeno, se requiere de un gran volumen. ¿Qué volumen haría falta si el hidrógeno se encuentra en estado líquido?. Para responder a la pregunta se va a utilizar el mismo procedimiento. Para empezar se requiere la tabla de conversiones del hidrógeno proporcionada por la AeH2.

Masa H2 (kg)	↔	H2 gas (Nm3)	↔	H2 líquido1 (litros)	↔	Energía2 (MJ)	↔	Energía2 (kW-h)
1	=	11,12	=	14,12	=	120	=	33,33
0,0899	=	1	=	1,270	=	10,8	=	3,00
0,0708	=	0,788	=	1	=	8,495	=	2,359
0,00833	=	0,0926	=	0,1177	=	1	=	0,278
0,0300	=	0,333	=	0,424	=	3,6	=	1

1 El hidrógeno es líquido a presión atmosférica por debajo de 20,39 K
2 Basado en poder calorífico inferior

Densidad	0,0899 kg/Nm3 (gas) 0,0708 kg/l (liquido)
----------	--

Tabla 14.2.2_01: Equivalencias del hidrógeno AeH2

Aplicando la relación señalada de la *Tabla 14.2.2_01*, se obtiene que:

$$\frac{3,6 \cdot 10^6 \text{ [kW} \cdot \text{h]} \cdot 1,270 \text{ [L H}_2\text{]}}{3 \text{ [kW} \cdot \text{h]}} = 1.524.000 \text{ L H}_2$$

$$\frac{1.463.040}{1000} = 1.524 \text{ m}^3 \text{ H}_2$$

20,39 K = -252,76 °C Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Es decir, almacenando el H₂ en forma líquida, se requiere un depósito de 1.524 m³.

14.2.3 Diesel Oil

Para poder comparar adecuadamente los volúmenes ocupados por el hidrógeno (líquido o gas) y el diésel oil, se empleará la misma base de cálculo para aquel volumen que proporcione una energía de 2,16 GWh.

VECTOR ENERGÉTICO	ENERGÍA A ALMACENAR [GWh]	%	ENERGÍA A PRODUCIR [GWh]
Hidrógeno	3,6	60	2,16
Diesel Oil	5,7	38	2,16

Tabla 14.2.3_01: Energía a almacenar frente a energía a producir

En la *Tabla 14.2.3_01* los porcentajes de 60% y 38%, hacen referencia a la eficiencia de conversión en las pilas de combustible y los grupos generadores respectivamente.

Sabiendo que el calor de combustión del diesel oil está sobre 43 MJ/kg y que 1 kWh equivale a 3,6 MJ, se puede determinar los kg de diesel oil equivalentes a 5,7 GWh y en su defecto, los metros cúbicos.

$$5,7 \cdot 10^6 \text{ kWh} \cdot 3,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} = 20,52 \cdot 10^6 \text{ MJ}$$

$$\frac{20,52 \cdot 10^6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}}{43 \text{ MJ}} = 477.209 \text{ kg de diesel oil}$$

$$V_{\text{diesel}} = \frac{\text{Masa}_{\text{diesel}}}{\text{Densidad}_{\text{diesel}}} = \frac{477.209 \text{ kg} \cdot \text{m}^3}{850 \text{ kg}} ; V_{\text{diesel}} = 561 \text{ m}^3$$

Se necesitan 561 m³ de diesel oil para almacenar 5,7 GWh y producir 2,16 GWh. Si se comparan los 561 m³ calculados frente a los 660 m³ de combustible que se posee en la central térmica en la realidad, se llega a la conclusión de que es un resultado aceptable.

14.2.4 Comparativa de combustibles y sistemas de almacenamiento

La *Tabla 14.2.4_01* de elaboración propia, compara las características según la forma de almacenamiento de cada combustible.

CARACTERÍSTICAS	DIESEL - OIL	H ₂	H ₂
ENERGÍA ALMACENADA [GW·h]	5,7	3,6	3,6
PRESIÓN TANQUE [bar]	1,013	700,0	1,013
TEMPERATURA TANQUE [°C]	25	25	-252,76
VOLUMEN TANQUE [m ³]	561	2.821	1.524
ESTADO	Líquido	Gas	Líquido

Tabla 14.2.4_01: Comparativa de combustibles y formas de almacenamiento

¿Qué conclusiones se pueden extraer de la tabla anterior? En primer lugar, el hidrógeno líquido ocupa menos espacio que el gas. No obstante, al estar líquido, se invierte entre el 30 y 40 % de la energía que se almacena para mantenerlo líquido, por lo que sería muy costoso. Todo ello sin tener en cuenta lo peligroso (a pesar de tener una infraestructura adecuada) de mantener tal cantidad de hidrógeno.

Aunque el hidrógeno gas ocupe tanto espacio, es quizás la mejor opción para almacenarlo. Este hidrógeno en forma de gas, se podría almacenar en tanques a 700 bar sin ser más peligroso que una instalación de gas natural.

Comparando el hidrógeno (gas y líquido), con el diesel oil, se puede afirmar que el hidrógeno pesa muchísimo menos que el del gasoil aunque parezca que ocupe más espacio. De hecho, la energía específica del hidrógeno es la mayor que se conoce.

Hablando por hablar, uno/ una puede pensar, ¿Porqué almacenar el hidrógeno en tanques si la isla de El hierro está llena de tubos volcánicos extintos?, ¿Se podría almacenar el hidrógeno en un tubo volcánico y así no usar la infraestructura de los tanques?. A nivel hipotético es lógico plantearse esa posibilidad. Esta idea alberga una serie de ventajas e inconvenientes.

Como ventajas se tiene el menor uso de infraestructura, al estar en un tubo volcánico extinto, se aprovecha el recurso propio de un espacio para almacenar algo, el hidrógeno estaría a mucha menos presión, entorno a los 50 - 100 bar según su tamaño, no existe impacto paisajístico y la más importante, al estar bajo tierra y no existir presencia de oxígeno, ante una chispa de electricidad estática o una fuente de ignición como una llama, no podría generar una explosión.

Como inconvenientes, existirían los problemas de fuga, si la roca es muy porosa se escaparía el hidrógeno, debería de ser un tubo volcánico sin importancia geológica y sin vida presente, ya que la biodiversidad existente no podría ponerse en riesgo. Finalmente tendría que estar en una zona cerca de la central de pilas de combustible y cerca del puerto, lejos de la ciudad pero de fácil acceso.

Esto que se plantea, y que a algunos/as les podría parecer como una catástrofe natural, hay que recordar el el hidrógeno es inocuo, no es perjudicial para la salud y además no es una idea aislada planteada en este punto, sino que en la realidad y en otros países, esto ya se ha hecho como es el caso del proyecto 'Advanced Clean Energy Storage' al sur de Salt lake City en Estados Unidos. Allí se almacenará hidrógeno en cavernas de sal. En ella se podrá almacenar 150 GWh con un coste menor a 10 veces el de tanques de hidrógeno.

A continuación se muestran las diferentes configuraciones posibles y casos ejemplo de almacenamiento de hidrógeno:



Imagen 14.2.4_01: H₂ a 700 bar



Imagen 14.2.4_02: H₂ líquido

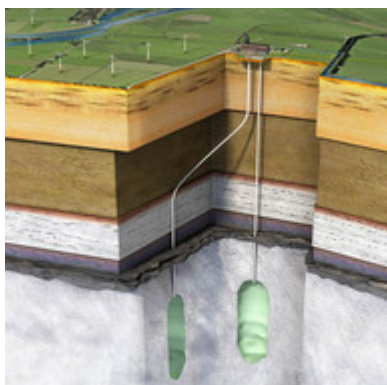


Imagen 14.2.4_03: H₂ en mina de sal



Imagen 14.2.4_04: H₂ en tubo volcánico

14.3 ¿Qué le hace falta a la tecnología del almacenamiento de hidrógeno para ser competitiva con el diésel?

En este apartado se tiene que hablar en primer lugar de la compra del hidrógeno y en segundo lugar de su infraestructura para almacenarlo. A día de hoy, ¿Cuál es el coste del hidrógeno? Según la International Energy Agency (IEA), para el 2019 estos serían los costes del hidrógeno.

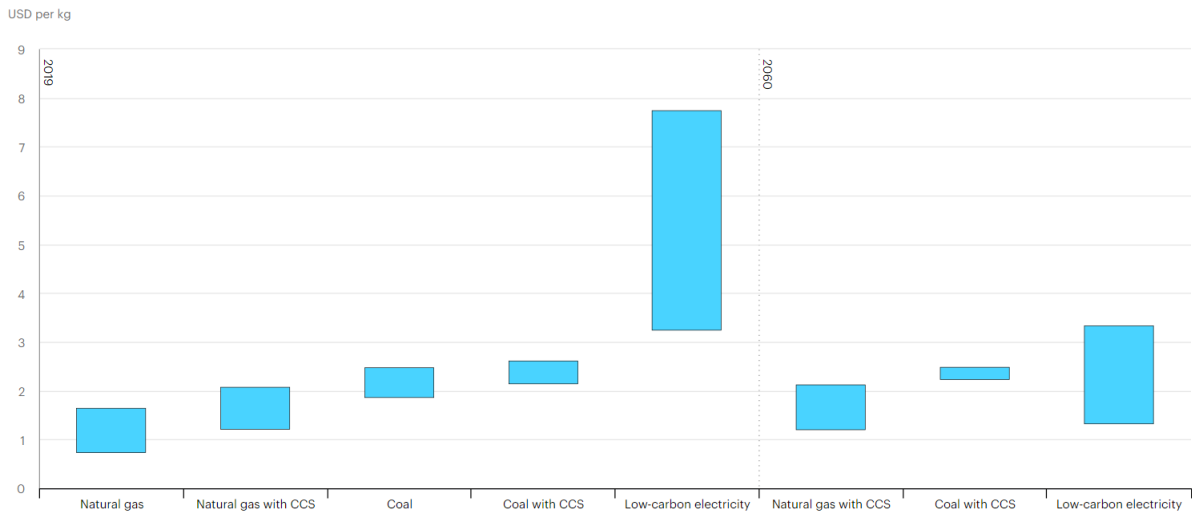


Imagen 14.3_01: Coste del H₂ para diferentes tecnologías de producción

Tal como se explicó en el apartado 2.4, el hidrógeno puede ser catalogado como gris, azul o verde, según su origen. De cara al estudio del presente TFG, comprar hidrógeno renovable costaría alrededor de 6 €/kg. No obstante el hidrógeno azul procedente del gas natural, aunque su producción genere CO₂, como este es almacenado y no emitido a la atmósfera, se tomará como válido hasta que el hidrógeno renovable baje su coste. Como se muestra en la Imagen 14.3_01, el coste de hidrógeno azul sería de alrededor de 2 €/kg.

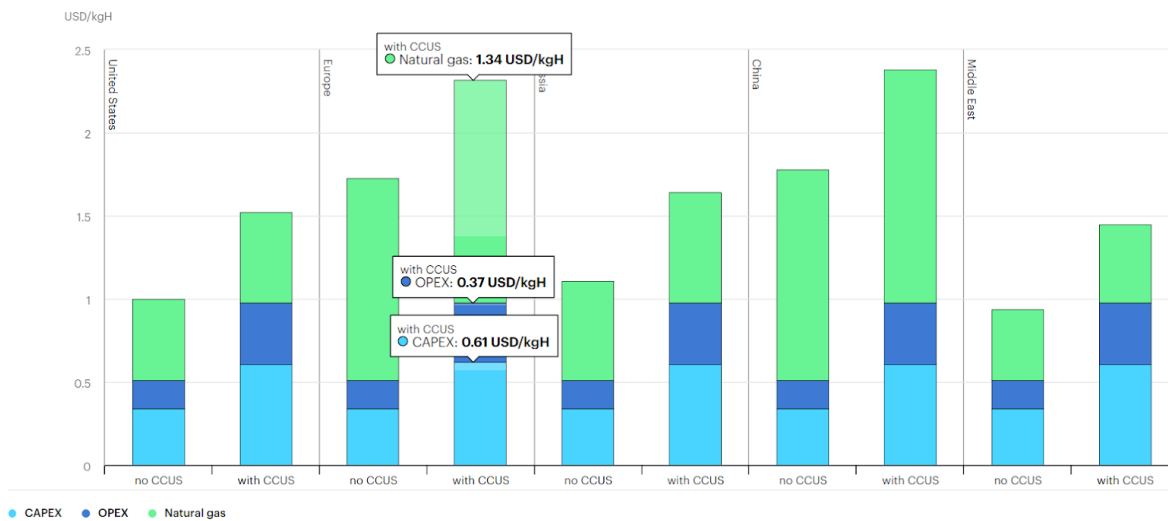


Imagen 14.3_02: Coste del gas natural, Opex y Capex para Europa

Por otro lado, volviendo a retomar los conceptos de Capex y Opex, en la gráfica de la *Imagen 14.3_02* proporcionada por la IEA, muestra los costes para los términos indicados. Si se observa la imagen *Imagen 14.3_01*, el coste del hidrógeno azul procedente de gas natural al cual se le captura el dióxido de carbono, para 2060 tendrá prácticamente el mismo coste.

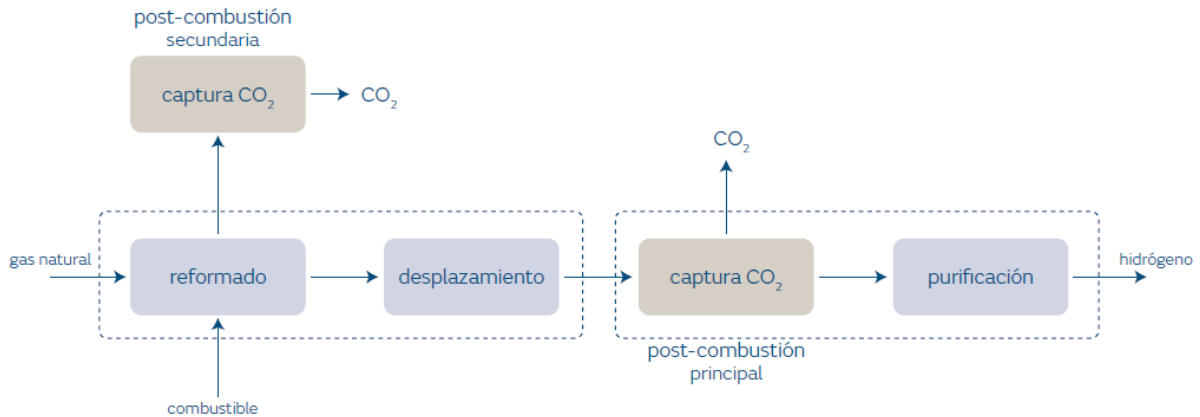


Imagen 14.3_03: Captura de dióxido de carbono

La *Imagen 14.3_03* muestra un diagrama genérico sobre las fases donde se captura el dióxido de carbono para la producción de hidrógeno azul. Aunque anteriormente se ha dicho que existe poco margen para bajar los costes, en esta clase de tecnología quizás si se pueda reducir los costes en la parte de captura del dióxido de carbono. A principios del 2020 el coste de su captura estaba a 25 €/tCO₂ y de cara a unos años incluso se podría bajar hasta 13 €/tCO₂. El hidrógeno proveniente del gas natural no es una solución, es la transición hasta que el hidrógeno verde procedente de renovables alcance cifras competitivas, pero, ¿Qué hay que hacer para conseguir esto?

Para que las tecnologías del H₂ renovable puedan convertirse en una alternativa real al uso del diesel, deben de bajar los costes a groso modo en:

- 1) Instalaciones fotovoltaicas y parques eólicos, tanto onshore como offshore.
- 2) Métodos para purificar y destilar el agua, tanto si es dulce o salada.
- 3) Hacer uso de electrolizadores alcalinos con electrodos de metales más baratos.
- 4) Infraestructura para el transporte y manipulación del hidrógeno.
- 5) Compresores de membrana de alta presión.

Para los puntos 1, 2, 4 y 5 existe margen para mejorar y bajar los costes pero es poco. Verdaderamente donde se tiene que actuar y apoyar en la investigación, es para el punto 3. Lo ideal sería la producción del hidrógeno por fotocatalisis, donde solo con la luz directa del sol, se pudiera producir una cantidad significativa de hidrógeno a un coste asequible.

¿Por qué se afirma utilizar a fecha de hoy solo electrolizadores alcalinos? Según el estudio de la Fundación Naturgy citada en puntos anteriores, los electrolizadores que utilizan como electrolito hidróxido de potasio (KOH), tienen menores costes que otras tecnologías como se presenta en la siguiente tabla:

Resumen de las principales características de distintos tipos de electrolizadores⁴⁸.

Stack			
Electrolito	Solución de KOH	Membrana polimérica	Óxido sólido
Portador de carga	OH ⁻	H ⁺	O ₂ ⁻
Densidad de corriente (A/cm ²)	0,5	2,0	2,0
Voltaje (V)	1,75 - 2,4 V	1,6 - 2,0 V	1,2 - 1,3 V
Temperatura de operación (°C)	60 - 80	50 - 80	650 - 1.000
Presión de trabajo (bar)	1 - 30	30 - 80	1
Eficiencia eléctrica (kWh/Nm ₃ de H ₂ producido)	4,3 - 5,5	4,5 - 5,4	3,2 - 3,7
Eficiencia eléctrica (% PCI)*	63 - 70	56 - 60	74 - 81
Sistema genérico			
Consumo eléctrico a capacidad nominal (kWh/kg)	51	55-70	41-40
Coste capital (€/kW)	750	1.200-2.000	12.000-4.500
Costes de O&M (€/kg/día/año)	32	58	600-225

*PCI: Poder calorífico inferior

Tabla 14.3_01: Resumen de las características de distintos tipos de electrolizadores

En conclusión respecto a la producción de hidrógeno los artículos científicos publicados en la revista Nature Energy, sitúan el mínimo precio para la viabilidad del hidrógeno verde por debajo de los 3,23 €/kg en un escenario europeo.

Respecto a los costes de almacenamiento si se hiciese bajo tierra, según un estudio del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), a día de hoy su costo estaría entorno a 3.013 \$/kWh (2.520,69 €/kWh) equivalente a hidrógeno a almacenar. Este coste no sería rentable por lo que, para que lo fuera, debería de bajar al menos a 1.507 \$/kWh (1260,76 €/kWh). Esto se podría conseguir para el año 2050.

En definitiva almacenar y transportar el hidrógeno tiene un coste energético y económico relativamente alto a día de hoy. Además se almacena mal en términos de densidad energética, ya que hace falta mucho volumen. Para el gas hidrógeno a 700 bar se posee una densidad energética de 3,7 kWh/kg y para el hidrógeno líquido se posee una densidad energética de 2,8 kWh/kg. Según datos proporcionados por Ariema S.L.

El coste del hidrógeno sigue estando lejos del coste del diesel oil que está sobre el 1,5 €/L y su almacenamiento en un depósito de combustible común es varias veces menor al hidrógeno.

Capítulo 15

15 Pilas de combustible de hidrógeno

En este capítulo se explica como funciona una pila de combustible de hidrógeno, que tipos existen, cual se selecciona para satisfacer el objeto de estudio del TFG y que medidas hay que tomar para conseguir que sea una tecnología competitiva

Tiempo de lectura 15 min aprox

15.1 Estado del arte en pilas de combustible de hidrógeno.

¿Que es una pila de combustible?. Citando al Centro Nacional del Hidrógeno, una pila de combustible **“es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Parte de un combustible (generalmente hidrógeno) y de un comburente (en muchos casos oxígeno) para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor.”**

Existen muchas formas de producir energía o almacenarla por medio de reacciones químicas, pero el hecho de hacer uso de pilas de combustible, es estar a otro nivel. La industria energética necesita dar el salto a las pilas de combustible y poder así dejar de “quemar cosas”. Las pilas de combustible pueden permitir una revolución energética en esta dura transición energética.

Para ello en este capítulo se analizará de forma general el estado del arte de las pilas de combustible. Seguidamente en los siguientes apartados se tratará de explicar las 2 tecnologías maduras como objeto de estudio para el TFG y finalmente se desarrollará qué mejoras necesitan para que se pueda empezar a implantar masivamente en esta industria.

Las pilas de combustible tienen la gran ventaja de no estar limitadas por el ciclo termodinámico de Carnot. Están sujetas al límite electroquímico de su reacción como se presenta en la siguiente *Imagen 15.1_01*:

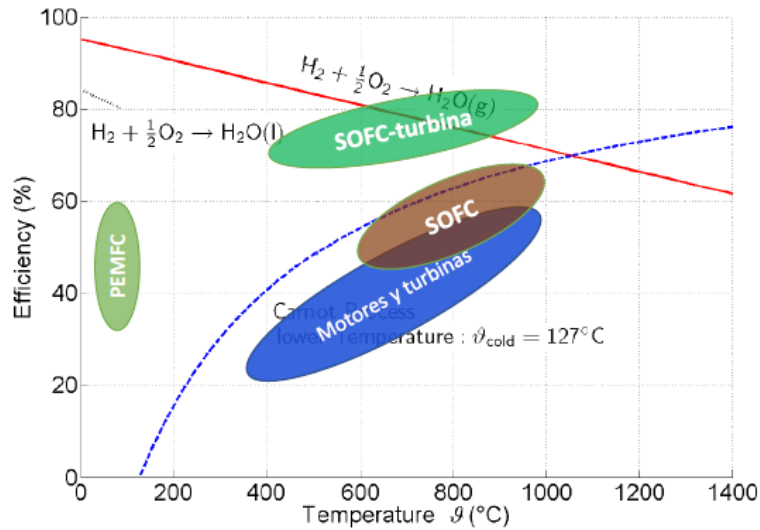


Imagen 15.1_01: Eficiencia vs t^θ para Máquinas térmicas y electroquímicas Ariema S.L

La línea roja representa la eficiencia de una pila de combustible en función de la temperatura. La curva azul representa la eficiencia de una máquina térmica en función de su temperatura. En la imagen también se introducen algunos tipos de pilas de combustible como son las PEMFC y las SOFC que se describirán a continuación.

Otra ventaja que presentan las pilas de combustible, son la reducción de pasos intermedios o transformaciones de energía intermedias para pasar de energía química a eléctrica y viceversa.

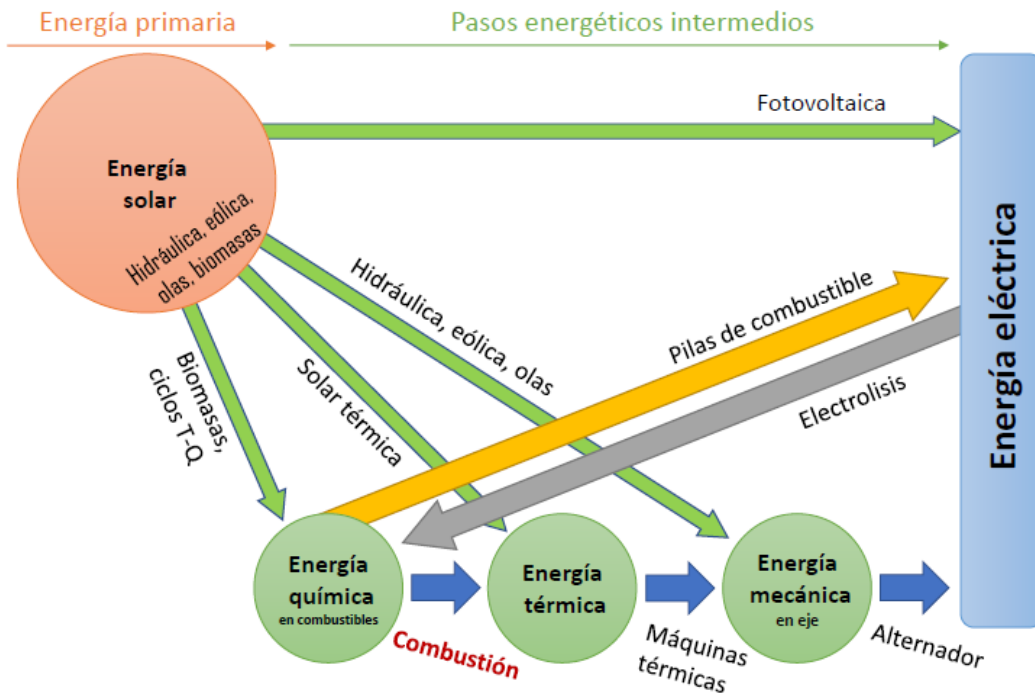


Imagen 15.1_02: Pasos energéticos Ariema S.L

Como se observa en la *Imagen 15.1_02* proporcionada por Ariema S.L, a diferencia de la Hidráulica, eólica y la energía de las olas, a pesar de poseer pocas transformaciones intermedias, estas no se pueden almacenar, en cambio la energía química de la reacción del hidrógeno con el oxígeno si que se puede almacenar.

¿Cuál es el comportamiento eléctrico de una pila de combustible? De forma general se puede afirmar las características de una celda de combustible como se presenta en la *Imagen 15.1_03*.

La curva azul representa el estado de funcionamiento normal que decrece en función de la exigencia de corriente eléctrica que se solicita. Este descenso viene determinado por su zona de activación situada entorno a 1 voltio, las pérdidas óhmicas se encontrarán en la zona central y finalmente las pérdidas por el flujo de los reactivos cuando se encuentran al final de la curva azul. En una vista global se determina que a mayor corriente menor tensión de la celda.

La curva verde representa el producto de la tensión por la intensidad, es decir la potencia de la celda. Su potencia máxima siempre se encontrará a $\frac{2}{3}$ de la curva. Paralelamente a esto, el consumo de hidrógeno de la celda depende linealmente de la corriente que proporcione y no depende del voltaje.

La curva naranja representa la eficiencia de la celda y su máximo valor se encuentra en el $\frac{1}{3}$ de la curva.

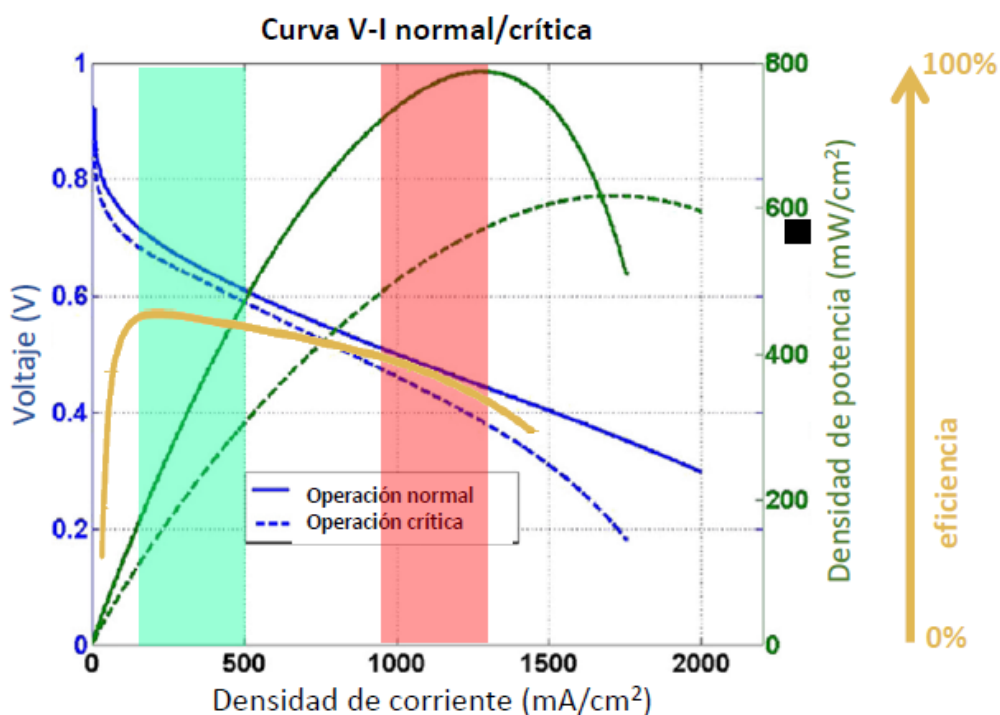


Imagen 15.1_03: Comportamiento eléctrico de una celda de combustible

Algunas expresiones básicas que están ligadas al dimensionado eléctrico de una pila de combustible son:

$$N = \frac{V_0}{V_{cel}}$$

N → Número de celdas en la pila de combustible
 V_0 → Voltaje de la pila de combustible [V]
 V_{cel} → Voltaje de celda [V/celda] suele ser de 0,7 V

$$J = \frac{I_{max}}{S_{total}}$$

J → Densidad de corriente de la celda [A/cm²]
 I_{max} → Intensidad máxima de la celda [A]
 S_{total} → Superficie total de la celda [cm²]

En definitiva las pilas de combustible se caracterizan por :

- Alta eficiencia eléctrica
- Facilidad para generación distribuida y cogeneración
- Posible uso continuo (frente a carga/descarga)
- Mejor eficiencia y durabilidad a cargas parciales
- Modularidad sin sacrificar eficiencia
- Otras” como “sin ruido”, “calidad de salida eléctrica”, etc.

Existen más de 20 tecnologías diferentes de pilas de combustible, no obstante en este apartado solo se tratara de explicar 3 tecnologías:

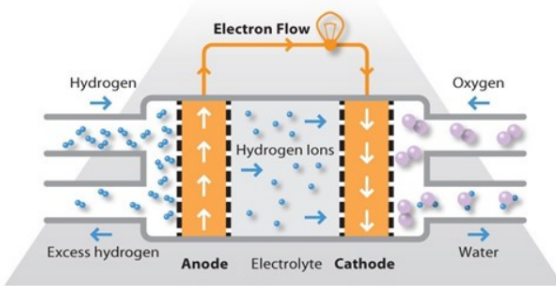
PHOSPHORIC ACID FUEL CELL (PAFC) PILA DE COMBUSTIBLE DE ÁCIDO FOSFÓRICO	
	DESCRIPCIÓN
	Consta de un ánodo y un cátodo de catalizador de platino. Es muy resistente al monóxido de carbono pero tiende a tener menor eficiencia que otros tipos de células de combustible en la producción de electricidad. Su temperatura de funcionamiento es de 180 °C y la eficiencia total puede ser superior al 80% si el calor del proceso se aprovecha.
SEMIREACCIONES Y REACCIÓN GLOBAL	EFICIENCIA Y MEJORAS
Ánodo: $2H_2(g) \rightarrow 4H^+ + 4e^-$ Cátodo: $O_2(g) + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ Global: $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia eléctrica es del 36-40 % • No parece que tenga muchas posibilidades de mejora.

Tabla 15.1_01: Phosphoric acid fuel cell

SOLID METAL OXIDE FUEL CELL (SOFC) PILA DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO DE METAL SÓLIDO	
	<p style="text-align: center;">DESCRIPCIÓN</p> <p>El electrolito es un sólido no orgánico. El ion de intercambio es un anión O²⁻. La temperatura de funcionamiento suele comprenderse entre 800-1000°C. Internamente se realiza un reformado de combustibles.</p>
<p>EFICIENCIA Y MEJORAS</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ● Eficiencia eléctrica entorno a 60% ● No parece que tenga muchas posibilidades de mejora. 	

Tabla 15.1_02: Solid metal oxide fuel cell

MOLTEN CARBONATE FUEL CELL (MCFC) PILA DE COMBUSTIBLE DE CARBONATO FUNDIDO	
	<p style="text-align: center;">DESCRIPCIÓN</p> <p>El electrolito es un carbonato (ej., Na₂CO₃, K₂CO₂, oLi₂CO₃) para esta pila de combustible. Operan a 600-1000°C, donde los carbonatos forman unas “sales fundidas” de alta conductividad iónica con CO₃⁼. Para ánodo y cátodo, basta usar Ni y NiO (electrodos baratos). La eficiencia global puede alcanzar el 85%. Se emite dióxido de carbono.</p>
<p>SEMIREACCIONES Y REACCIÓN GLOBAL</p>	<p>EFICIENCIA Y MEJORAS</p>
<p>Anode:</p> $H_2 + CO_3^{=} = H_2O + CO_2 + 2e^-$ <p>Cathode:</p> $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- = CO_3^{=}$ <p>Cell:</p> $H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2 = H_2O + CO_2$	<ul style="list-style-type: none"> ● La eficiencia eléctrica alcanza entre el 45 y 55%. ● No parece que tenga muchas posibilidades de mejora.

Tabla 15.1_03: Molten carbonate fuel cell

15.2 Dimensionado teórico de las pilas de combustible.

Pretender a realizar un dimensionado teórico de pilas de combustible en la escala de MW de potencia instalada estaría fuera de las competencias del presente TFG. Además no se contempla en los objetivos iniciales, por ello, solo se mencionará en este apartado, la existencia de empresas que son capaces de fabricar la pila de combustible y en definitiva realizar el proyecto completo.

Este es el caso de AFC Energy con web <https://www.afcenergy.com/technology/>. Citando un párrafo de presentación de su web anuncia : **“La excelente eficiencia y confiabilidad de conversión de combustible de las celdas de combustible alcalinas se han utilizado anteriormente en aplicaciones de misión crítica como las ejecutadas por la NASA en las misiones de la serie Apolo y en el transbordador espacial, así como en las misiones espaciales Ariane y Rusia. Sus usos ahora se están expandiendo como parte de los esfuerzos globales para descarbonizar la economía global, con cero neto 2050 como un objetivo clave a largo plazo.”**

Según se muestra en la web, pueden proporcionar equipos estacionarios del orden de MW, ideal para satisfacer la necesidad del presente TFG. El aspecto del equipos sería el siguiente:



Imagen 15.2_01: Sistema estacionario AFC del orden de MW de potencia instalada

15.2.1 Pila de combustible alcalina (AFC).

La tecnología de pila de combustible alcalina funciona mediante la combinación electroquímica de hidrógeno y oxígeno en un proceso sin combustión. Al hacerlo, produce electricidad, calor y agua. La generación eléctrica será continua, mientras que las celdas de combustible cuentan con una fuente continua de hidrógeno y oxígeno (del aire) para mantener la reacción de la celda de combustible.

ALKALINE FUEL CELL (AFC) PILA DE COMBUSTIBLE ALCALINA	
<p>The diagram illustrates the internal structure of an Alkaline Fuel Cell (AFC). It shows three main sections: the Anode on the left, the Electrolyte in the center, and the Cathode on the right. Hydrogen (represented by two small circles) enters the Anode from the left. Oxygen (represented by two larger circles) enters the Cathode from the right. The Electrolyte contains Hydroxyl ions (represented by one small circle and one larger circle). Electrons (e⁻) flow from the Anode through a Load to the Cathode. Water (represented by one small circle and one larger circle) is produced at the Anode and exits to the left. The overall reaction is shown as: $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$ at the Anode and $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ at the Cathode.</p>	<p>DESCRIPCIÓN</p> <p>Las pilas alcalinas fueron las primeras en “salir del laboratorio”, en aplicaciones espaciales. El electrolito es KOH, soportado en una matriz de asbestos. Como combustible emplea hidrógeno puro. Tanto el monóxido de carbono como el dióxido de carbono pueden “envenenar” la pila haciendo reaccionando con el KOH para dar K₂CO₃</p>
<p>SEMIREACCIONES</p>	<p>EFICIENCIA Y MEJORAS</p>
<p>Ánodo $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$ Cátodo $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia eléctrica es del 40-60 % • No parece que tenga muchas posibilidades de mejora.

Tabla 15.2.1_01: ALKALINE FUEL CELL (AFC)

Su desarrollo las llevó a ser las escogidas para proporcionar energía auxiliar y agua en el programa espacial Apolo. Aunque pueden trabajar a un rango de temperatura entre los 65-250 °C, su operación habitual se centra entre 150 °C-200 °C. En estas temperaturas pueden alcanzar sus máximas eficiencias que pueden llegar al 70 %, lo cual depende básicamente de las partículas de platino depositadas como centros activos en uno de sus electrodos.

Usar pilas alcalinas para solucionar el problema objeto del TFG es la opción más adecuada. La eficiencia global del 70% se podría aprovechar usando el calor que genera para producir agua caliente sanitaria (ACS). Esta podría ser usada en instalaciones cercanas, en el pueblo más cercano, en el aeropuerto o en los lugares colindantes donde se emplacen las pilas de combustible.

15.2.2 Pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC).

Las celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico fueron desarrolladas por General Electric en los años 60 para la NASA. Durante los años 70 y comienzos de los 80 el interés disminuyó debido a su costo comparado con los demás tipo de celdas de combustible. Su alto costo se debía a la gran cantidad de platino (Pt) usado como catalizador (alrededor de 28 mg/cm²). A mediados de los 80 y principio de los 90 renació el interés puesto que las investigaciones realizadas desarrollaron membranas que requerían menor uso de platino. En la actualidad el uso del platino en las membranas de las celdas de combustible se ha reducido hasta el orden de 0,2 mg/cm².

PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC) PILA DE COMBUSTIBLE DE INTERCAMBIO PROTÓNICO	
<p>The diagram illustrates the internal structure and operation of a PEMFC. It shows a central electrolyte membrane flanked by an anode on the left and a cathode on the right. Fuel (H₂) enters from the left, and air (O₂) enters from the right. Protons (H⁺) migrate from the anode to the cathode through the membrane. Electrons (e⁻) flow from the anode to the cathode through an external circuit, creating an electric current. Excess fuel, unused air, water, and heat are shown exiting the cell from the bottom.</p>	DESCRIPCIÓN
SEMIREACCIONES Y REACCIÓN GLOBAL	EFICIENCIA Y MEJORAS
<p>Reacción anódica : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$</p> <p>Reacción catódica : $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$</p> <p>Reacción global : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia eléctrica es del 40-50 % • Tiene muchos factores a mejorar.

Tabla 15.2.2_01: PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)

Ya que este tipo de pila de combustible tiene un gran margen de mejora, no es la mejor opción para satisfacer la necesidad del presente TFG. No obstante, si se superan las barreras que se describen en el apartado siguiente, sí que sería la opción a elegir.

15.2.3 Comparativa de las pilas de combustible.

¿Por qué es importante comparar las tecnologías de pilas de combustible? Es importante garantizar y estar seguros de la elección tomada en el apartado 15.2.1 es correcta. En base al estudio de la Fundación Naturgy a continuación se comparan las características esenciales de las tecnologías planteadas en el objeto de estudio del TFG.

Tipos de pilas de combustible					
	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Combustible utilizado	Hidrógeno o metano	Hidrógeno	Hidrógeno	Metano	Hidrógeno o metano
Rango de potencia (kW)	1-100	1-100	5-400	300-3.000	1-2.000
Eficiencia (%) H ₂ /CH ₄	60/40	60/-	40/-	-/50	70/60
Temperaturas de operación (°C)	40-80	65-220	150-210	600-700	600-900
Aplicación	Transporte Electricidad Cogeneración Generación distribuida	Electricidad Aplicaciones espaciales	Electricidad Cogeneración	Generación estacionaria a gran escala	Electricidad Cogeneración Generación distribuida

Tabla 15.2.3_01: Tecnologías de pilas de combustible

A pesar de que en la tabla no aparece el coste de la tecnología, se pueden comparar los rendimientos y tipos de combustible. Las pilas alcalinas AFC son la mejor opción para poder descarbonizar el SEP de la isla.

15.3 ¿Qué le hace falta a la tecnología de pilas de combustible de hidrógeno para ser competitiva con el diésel?

Para conseguir que las tecnologías de las pilas de combustible puedan competir con el diesel se tiene que analizar todos sus aspectos constructivos.

Las pilas de combustible son muy caras fundamentalmente porque usan platino como catalizador en los electrodos. La reducción de oxígeno en el cátodo es una reacción cinéticamente bastante lenta, lo que compromete la potencia total del sistema si no se usa platino. Hay un esfuerzo internacional muy importante que busca el desarrollo de nuevos electrocatalizadores que sean más baratos que el Pt como los óxidos metálicos de Co, Mn, materiales basados en carbono, entre otros.

Otro motivo por el que las pilas de combustible son tan costosas es debido a que su fabricación a día de hoy sigue siendo un trabajo muy artesanal. Esto es a consecuencia de la alta cantidad de realización de acciones para su creación y ensamblaje. Para abaratar costes de fabricación es imprescindible la automatización y a continuación se propone una forma para conseguirlo:

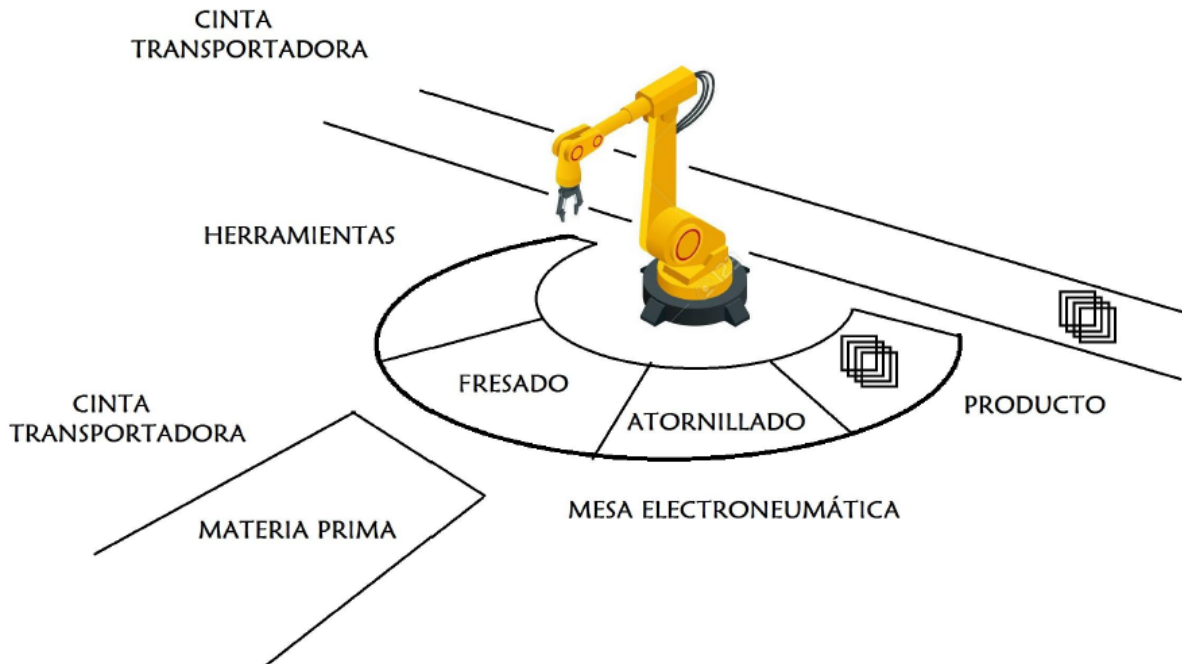


Imagen 15.3_01: Propuesta de estación de trabajo

Tal y como se presenta en la *Imagen 15.3_01* de forma muy sencilla y genérica una estación de trabajo automatizada. Se puede observar un brazo robótico de al menos 8 grados de libertad con gran versatilidad para el cambio de forma automática de su herramienta. Está situado en el centro de unas áreas con mesas y herramientas para la fabricación de los stacks de las pilas de combustible. Externamente le llega una cinta transportadora con la materia prima a procesar y otra cinta transportadora donde dejaría el stack parcialmente ensamblado.

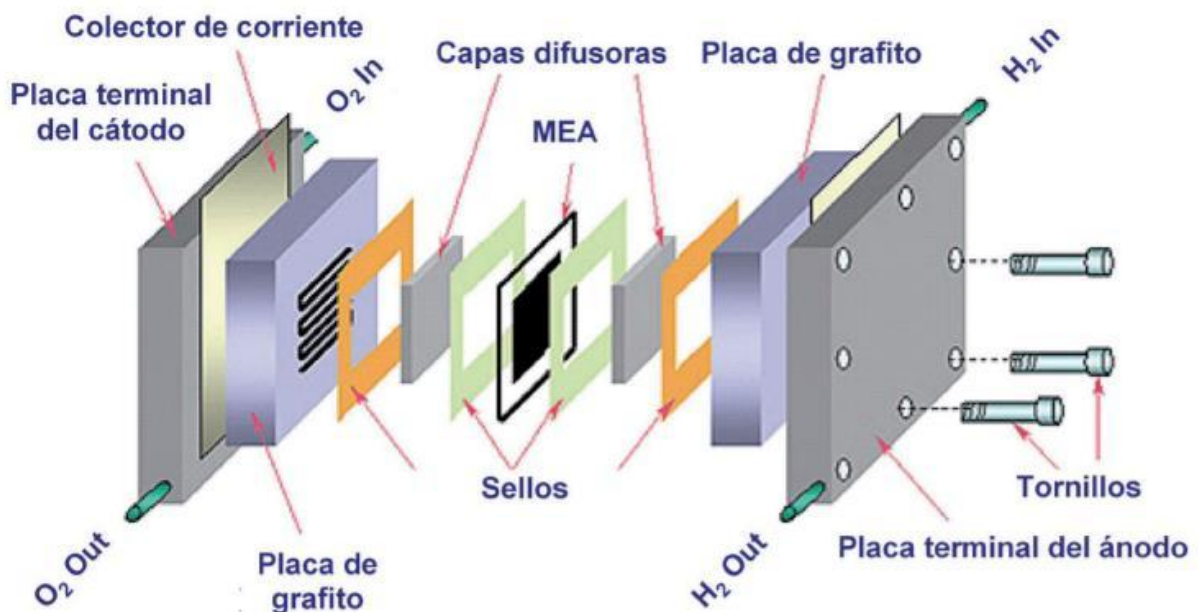


Imagen 15.3_02: Partes de una pila PEM

Como se muestra en la *Imagen 15.3_02* está compuesta por decirlo de alguna forma por muchos elementos. Un estudio realizado por el Departamento de Energía de Los Estados Unidos realizado en el 2015 determina el coste de las pilas de combustible por kW neto de potencia.

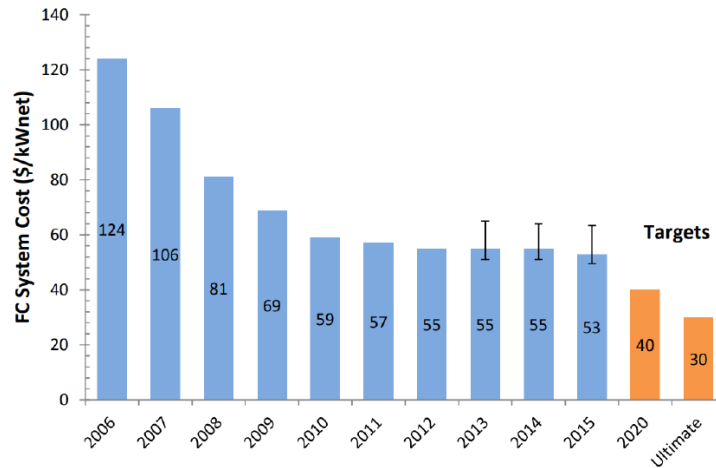


Imagen 15.3_03: PEMFC System cost

Para el año 2015 su coste era de 53 \$/kWnet (44,55 €/kWnet). Suponiendo que ese coste es el mismo para el año 2019 y sabiendo que para la isla se necesitaría como mínimo 3 MW, el coste podría ascender hasta los 133.650 €. Este coste proporcionado no es real, solo pretende demostrar que es una tecnología costosa.

Por ello, ¿Que hay que hacer para conseguir que sea más competitivo?. En base al mismo estudio se puede determinar que 3 factores debería de bajar su coste. En primer lugar, para una producción de 500.000 unidades anuales lo más costoso son los electrodos que tienen platino esencial para la catálisis, por lo que se tiene que sustituir por otros elementos más baratos. En segundo lugar las placas bipolares, su coste se puede reducir usando acero inoxidable o grafito. En tercer lugar la membrana de Nafion.

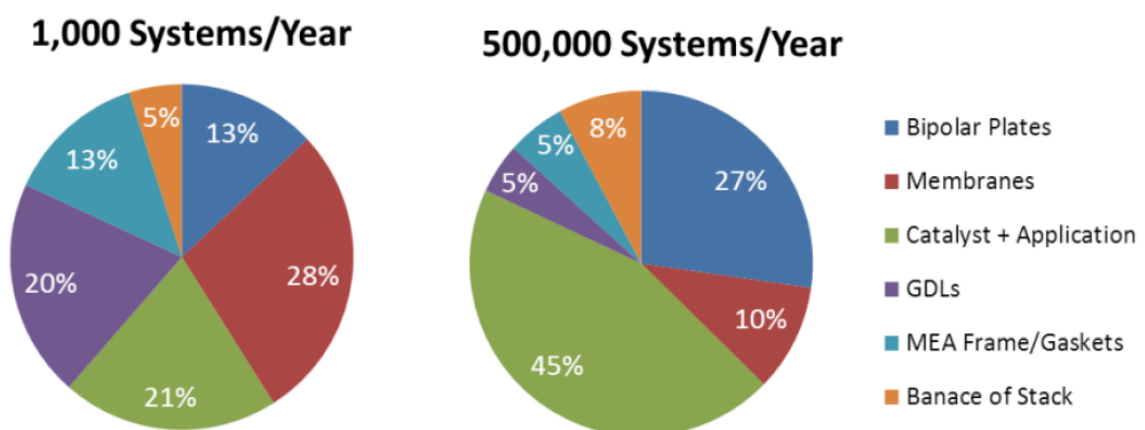


Imagen 15.3_04: Cost system per year PEMFC

Finalmente si se compara las pilas de combustible con un grupo generador diesel oil de la misma potencia instalada se puede observar que el coste de las pilas es varias veces superior por lo que dista aún de poder ser competitivo.

Capítulo 16

16 Emisiones de gases de efecto invernadero

En este capítulo se pretende cuantificar de forma aproximada las emisiones de CO₂ para la isla en el sistema de generación eléctrica y su posible coste por contaminación.

Tiempo de lectura 5 min aprox

Para averiguar qué cantidad de CO₂ se ha emitido en el 2019 y cuánto se ha pagado por la contaminación, se han empleado datos del PNIEC y la Declaración Ambiental de Unelco. Ya que no existen datos directos para el 2019 se ha realizado una serie de estimaciones que se explican a continuación.

Precios internacionales de los derechos de emisión de gases de efecto invernadero (Unidades: € a precios constantes de 2016/ tCO ₂)				
Años	2015	2020	2025	2030
Coste del derecho de emisión	7,8	15,5	23,3	34,7

Fuente: Comisión Europea

Tabla 16_01: Coste del derecho de emisión

Para obtener el coste del derecho de emisión de CO₂ para el 2019, se ha realizado una regresión lineal para los años proporcionados por la *Tabla 16_01* del Plan Nacional de Integrado de Energía y Clima 2021-2030. Aplicando la ecuación de la recta presente en la *Imagen 16_01*, se obtiene que para el 2019 se pagaría por emitir una tonelada de CO₂ 14,13 €.

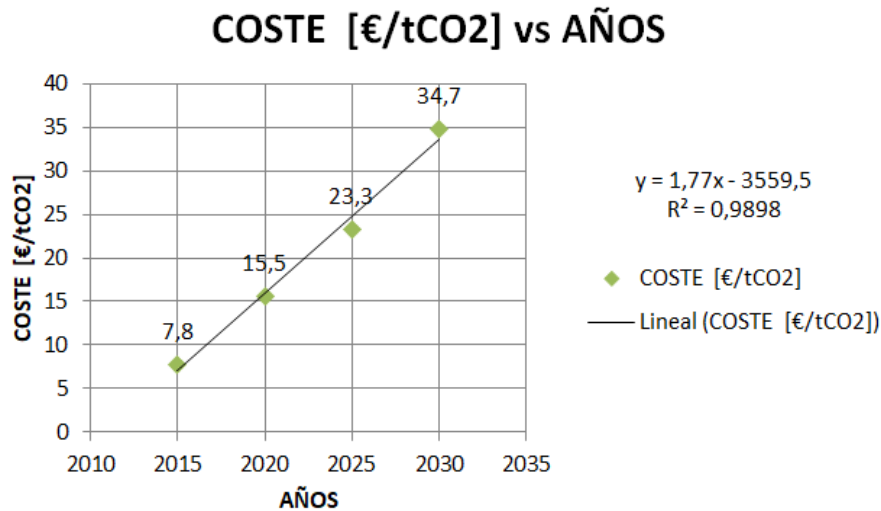


Imagen 16_01: Coste del derecho de emisión

En la Declaración Medioambiental de la central térmica de Llanos Blancos realizada en el año 2018 se determinan las toneladas de CO₂ emitidas para los años del 2014 al 2018. Como para el estudio del TFG se necesitan saber las emisiones en el año 2019, se ha realizado una regresión lineal para estimar las toneladas emitidas. En la *Imagen 16_02* se muestra los valores emitidos a la atmósfera. Empleando el mismo mecanismo que en el paso anterior, se obtiene que para 2019, se emitieron de forma aproximada 10.000 toneladas de CO₂.

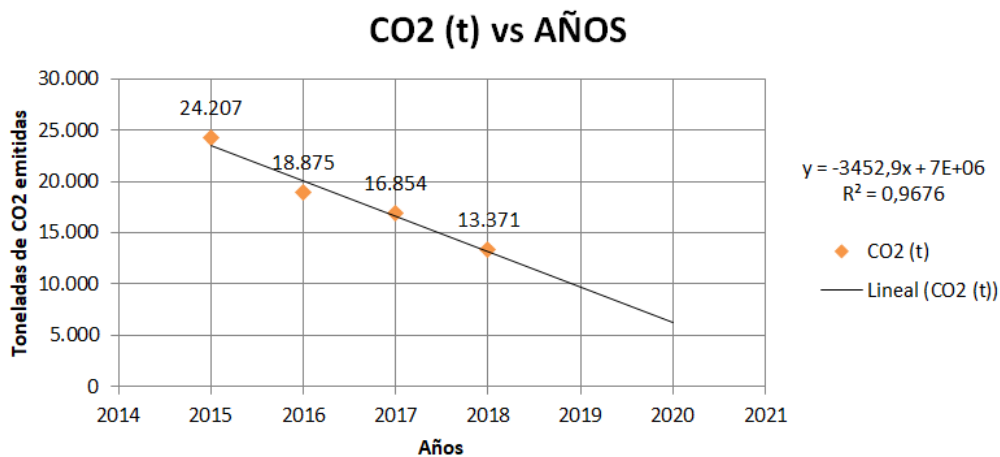


Imagen 16_02: Emisiones de CO₂

Por lo tanto, si para el 2019 se emitieron en la isla 10.000 toneladas de CO₂ en generación eléctrica, se pagaron 141.300 €. A pesar de que el diesel oil es más económico, el coste por derechos de emisión de CO₂, encarece de forma global esta tecnología. Una ventaja que presenta el hidrógeno frente al diesel, es que al no emitir ninguna clase de gas de efecto invernadero no se pagaría ninguna tasa de contaminación. El hidrógeno será más caro pero el diesel al pagar la tasa de contaminación, hace que se equilibre la balanza y los dos combustibles sean competitivos. De cara al año 2030 y 2050 esta tasa se elevaría tanto que podría convertir al diesel oil en un combustible no rentable.

Capítulo 17

17 Aspectos de seguridad y normativa en infraestructuras de hidrógeno

En este capítulo se pretende recopilar, mencionar e incluso realizar algún cálculo, respecto a los aspectos más importantes para la seguridad en instalaciones de hidrógeno y sus normativa.

Tiempo de lectura 15 min aprox

La directiva ATEX es aquella que define los equipamientos y sistemas de protección necesarios en aquellas zonas de trabajo que se consideren de riesgo por ser propensas a formaciones de atmósferas explosivas. Dado que un sistema estacionario de pilas de combustible que usa hidrógeno puede estar sometido a una atmósfera explosiva, se tiene que tratar en este capítulo todo lo relacionado con la directiva ATEX. Se entiende por ATMÓSFERA EXPLOSIVA toda mezcla, en condiciones atmosféricas, de aire y sustancias inflamables en forma de gas, vapor o polvo en la que, tras la ignición, se propaga la mezcla no quemada.

En primer lugar, ATEX es una abreviatura, que significa “ATmosphère EXplosible”. Al mismo tiempo, ATEX es la denominación abreviada de la directiva europea 94/9/CE para la puesta en circulación de aparatos, componentes y sistemas de protección eléctricos y mecánicos con protección contra explosiones.

DIRECTIVAS ATEX	ATEX 95 directiva 94/9/EC
	Regula equipos y sistemas de protección cuya intención es para su uso en atmósfera potencialmente explosivas.
	ATEX 137 directiva 99/92/EC
	Señala los requerimientos mínimos para la mejora de la protección de la seguridad y salud de los trabajadores expuestos a riesgos derivados de atmósferas explosivas.

Tabla 17_01: Directivas Atex

Las directivas que se van a tratar son las que se muestran en la *Tabla 17_01*. Para ello a continuación se va a ver el triángulo de la combustión, el pentágono del fuego y diferentes fuentes de ignición de una atmósfera explosiva.

El triángulo de combustión es un modelo que describe los tres elementos necesarios para generar la mayor parte de los fuegos: un combustible, un comburente y una fuente de ignición.

El pentágono de fuego representa los cinco factores más importantes que influyen en un incendio: un oxidante, una fuente de ignición, partículas sólidas en suspensión, polvo confinado y combustible en polvo.



Imagen 17_01: Triángulo de la combustión



Imagen 17_02: Pentágono del fuego

Como fuentes de ignición se ha realizado un esquema de elaboración propia donde se resumen la 5 fuentes más usuales:



Imagen 17_03: Fuentes de ignición

Respecto a la fuente de ignición de electricidad estática se va a realizar un pequeño cálculo orientativo. Estando dentro de los límites de explosión y detonación mostrados en el punto 2.4, para desencadenar tanto una explosión como una detonación con hidrógeno, la mínima energía de activación es de 0,017 mJ. Ya que los julios a veces es un poco difícil de imaginar, ¿Cómo sería con magnitudes eléctricas?. Recordando que 1 culombio es igual a 1 amperio por 1 segundo y esto a su vez equivale a 6,25 por diez elevado a 18 electrones. Por otro lado 1 Julio es iguala a 1 vatio por 1 segundo y a su vez 1 voltio por 1 culombio.

Con estas relaciones y suponiendo que la chispa de electricidad estática posea 1 culombio, se puede determinar que:

$$0,017 \cdot 10^{-3} J = \text{¿? } V \cdot 1 C ; 17 \mu V$$

Con una diferencia de potencial de 17 μV y estando dentro de los límites indicados anteriormente, se podría desencadenar tanto una explosión como una detonación con hidrógeno. Se indica “suponiendo”, por que que la electricidad estática al producirse por triboelectricidad en fracciones de tiempo muy pequeñas y difíciles de cuantificar, se parte desde este supuesto.

A continuación se presenta una tabla de elaboración propia donde se resumen la clasificación de los equipos de protección según la UNE-EN 60079-14 (vigor)

CATEGORÍAS	1	2	3
ZONAS	0 / 20	1 / 21	2 / 22
CRITERIOS DE ZONA	Atmósfera explosiva presente de forma permanente > 1000 h año	Atmósfera explosiva presente ocasionalmente entre 10 y 1000 h año	Atmósfera explosiva presente accidentalmente < 10 h año
PELIGRO	Alto	Medio	Bajo
CLASIFICACIÓN	Ga / Da	Ga / Gb Da / Db	Ga / Gb / Gc Da / Db / Dc

Tabla 17_02: Tabla resumen equipos de protección

Resaltar que en la fila de clasificación la “G” significa gas y la “D” dust o polvo. Sus clasificaciones son acumulables para las categorías existentes.

¿Como esta clasificado el hidrógeno en esta normativa?. Según la *Tabla 17_03* ,se muestra la categoría en la que está el hidrógeno, en este caso la II.

SUSTANCIA	UNE-EN 60079-14	CLASE	TEMPERATURA [°C]
I Metano	I	T1	450
IIA Propano	II	T2	300
IIB Etileno		T3	200
IIC Hidrógeno, Acetileno		T4	135
IIIA Partículas inflamables	III	T5	100
IIIB Polvo no conductor		T6	85
IIIC Polvo conductor			

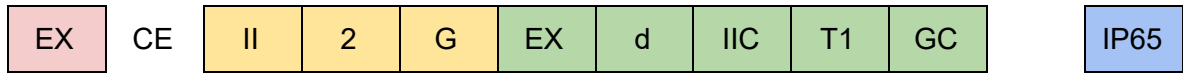
Tabla 17_03: Clasificación de sustancias y temperaturas de llama

Finalmente, antes de poder explicar el marcado que debe llevar cualquier aparataje eléctrica en una atmósfera ATEX, se tienen que mostrar los modos de protección para los equipos eléctricos. Estos vienen recogidos en la siguiente tabla.

Modo de protección	Símbolo	Diagrama	Norma UNE-EN
Envolvente antideflagrante	d		60079-1
Sobrepresión Interna	P		60079-2
Relleno pulverulento	q		60079-5
Inmersión en aceite	o		60079-6
Seguridad aumentada	e		60079-7
Seguridad intrínseca	I		60079-11
Salas presurizadas	P		60079-13
MODO "n"	n		60079-15
Encapsulado	m		60079-18
Sistema seguridad intrínseca	I		60079-25
Protección radiación óptica	op		60079-28

Tabla 17_04: Modos de protección para equipos eléctricos

Un motor eléctrico que estuviera presente en una atmósfera en la que podría haber hidrógeno su marcado debería de ser el siguiente:



- EX: Equipo ATEX.
- CE: Marcado calidad Europea.
- II 2 G: Categoría sustancia gas.
- d: Envoltente antideflagrante.
- IIC: Hidrógeno.
- T1: Temperatura de llama >450°C.
- GC: Clasificación, peligro bajo, atmósfera explosiva presente < 10 h al año.
- IP65: Índice de protección → Equipo hermético al polvo y protegido contra el agua proyectada.



Imagen 17_04: Motor no zona ATEX

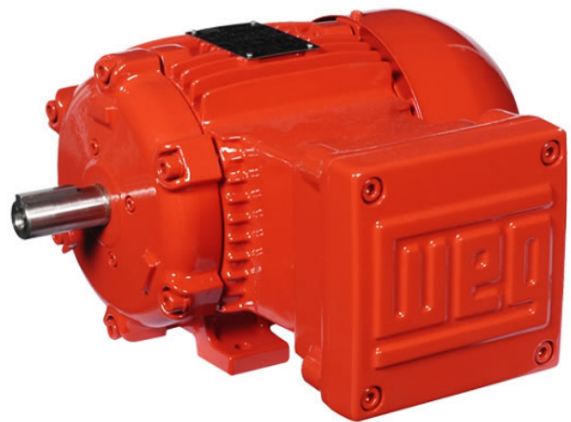


Imagen 17_05: Motor en zona ATEX

Comparando las imágenes anteriores, un motor eléctrico normal frente a otro en una atmósfera ATEX, se puede ver que, el de la zona atex es mucho más robusto y estanco.

La señales que determinan un equipo ATEX o una zona ATEX son las siguientes:



Imagen 17_06: Equipos ATEX



Imagen 17_07: Zonas ATEX

Como a ejemplo de zonas ATEX, de carácter general existen 2 zonas, para gases y para partículas en suspensión. En cada una de las 2 casos que se presentan a continuación existen las zonas explicadas anteriormente en la *Tabla 17_02*.

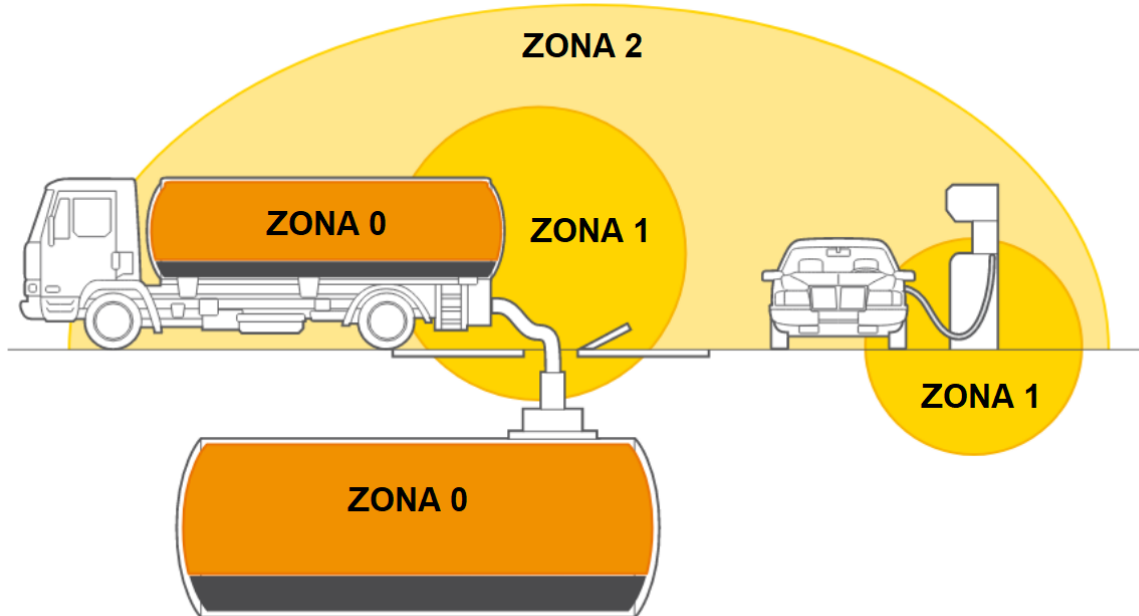


Imagen 17_08: Zonas ATEX en una gasolinera común (GASES)

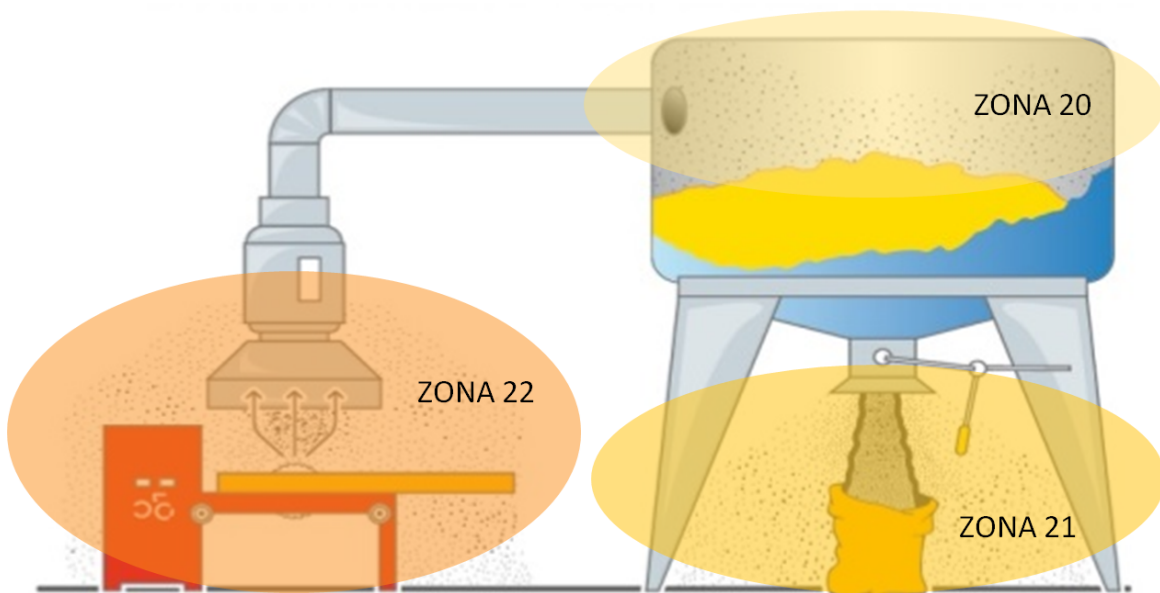


Imagen 17_09: Zonas ATEX en un aserradero (POLVO)

Los materiales que se suelen emplear para la aparamenta eléctrica en zonas ATEX son:



Imagen 17_10: Materiales para aparamenta eléctrica en zonas ATEX

Más concretamente, de todos los aceros inoxidable que existen, el más interesante es el acero inoxidable 316 ya que es capaz de soportar la difusividad del hidrógeno y su fragilización. Estos términos se desarrollarán más adelante.

Es muy importante mencionar el aislamiento que deben tener los conductores eléctricos en esta clase de atmósferas. Su designación viene determinada a continuación:

DESIGNACIÓN	AISLAMIENTO	DESIGNACIÓN	AISLAMIENTO	DESIGNACIÓN	AISLAMIENTO
RVMV-K FB RH 0,6/1kV	XLPE	RZ1MZ1-K (AS) 1kV	XLPE	EB VV-F 300/500V	PVC



Tabla 17_05: Aislamientos en conductores ATEX

Como se mencionó en el apartado 2.4, a continuación se va a explicar más detalladamente qué es el efecto Joule-Thomson. Este efecto es el proceso en el cual la temperatura de un sistema disminuye o aumenta al permitir que el sistema se expanda libremente manteniendo la entalpía constante. En otras palabras, por norma general, la mayoría de gases cuando están comprimidos y se expande se enfrían, como es el caso de un bote de desodorante. El bote está a temperatura ambiente pero cuando pulsamos para que salga el gas, se nota que el bote baja su temperatura, ¿verdad?.

Resulta que no todos los gases se comportan igual. Lo que comúnmente se conoce es que, si por ejemplo se comprime aire, éste se calentará y si se expande se enfriará. En el caso del hidrógeno, no ocurre lo mismo. El hidrógeno a entalpía constante, si se comprime se enfría y si se expande se calienta. ¿Cómo de peligroso puede ser esto?. Si tengo hidrógeno comprimido a una alta presión como pueden ser 700 bar y por el motivo que sea, se tiene una fuga en el tanque, si se expande, saldrá el hidrógeno caliente.

En este caso, alguien podría pensar, si la temperatura de autoignición del hidrógeno es de 585 °C, ese escape, ¿sería capaz de alcanzar la temperatura de autoignición del hidrógeno y convertirse en una fuente de ignición?. A continuación se van a realizar unos cálculos para ver qué ocurre. Antes de empezar, se tiene que tratar varios aspectos. En primer lugar, el hidrógeno tiene una temperatura de inversión térmica de 193 K. Esto significa que por debajo de esa temperatura el coeficiente de Joule-Thomson será positivo y por encima será negativo. Como el escape se va a producir a 298 K, este coeficiente será negativo.

Por otro lado, hay que explicar que el coeficiente Joule-Thomson no es un valor constante. Varía según presión y temperatura. No obstante para demostrar los cálculos que se realizará a continuación se tomará como constante. ¿Cómo se ha obtenido este coeficiente?. Su valor se ha obtenido del estudio realizado por Manfred Klell llamado “Storage of Hydrogen in the Pure Form” donde presenta la siguiente gráfica:

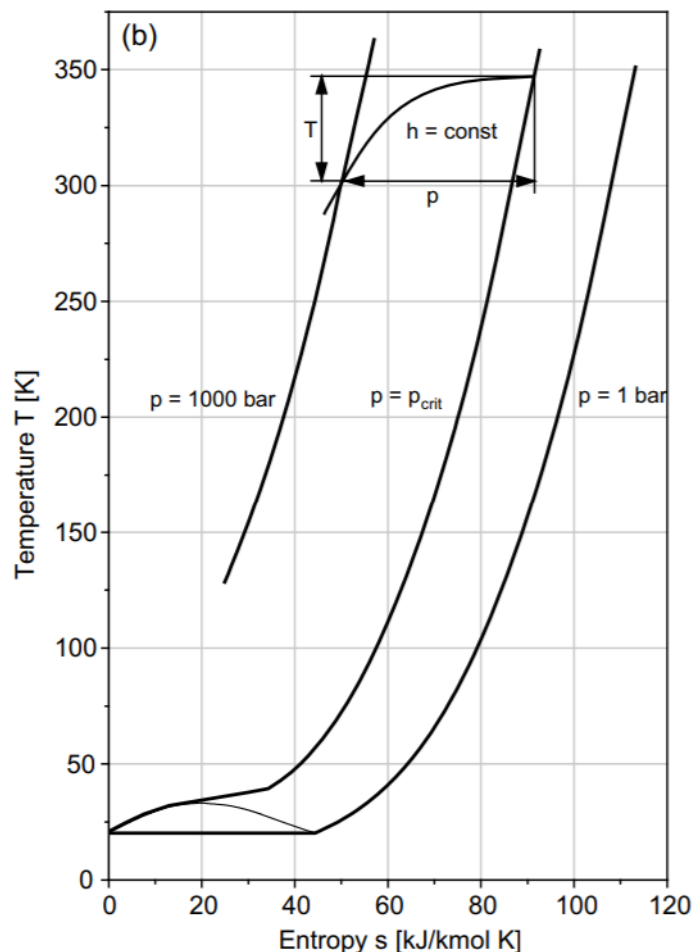


Imagen 17_11: b) isenthalpic expansion from 1000 to 13 bar.

Para interpretar la gráfica se observa que en el eje de las “x” está la entropía y en el eje de las “y” la temperatura, todo en unidades del sistema internacional. Antes de proseguir se definen los siguientes conceptos de forma sencilla:

- **Entropía:** Magnitud termodinámica que indica el desorden molecular de un sistema.
- **Entalpía:** Cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Las líneas curvas ascendentes, son curvas isobaras, es decir se mantiene la presión. Como se indica en la gráfica, las 3 curvas son para 1.000, 13 y 1 bar. Si se cambia la presión de 1.000 a 13 bar (curva pequeña que tiende a estabilizarse a 350 K), en ese tramo a entalpía constante, el hidrógeno se expande, aumentando su temperatura de 300 a 350. Sin hacer ningún cálculo, ya se sabe que en esas condiciones solo se incrementará 50 K el hidrógeno.

No obstante realizando los cálculos para ser más exactos, se obtiene el coeficiente Joule-Thomson con su expresión haciendo las siguientes consideraciones:

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H \quad \mu_{JT} \approx \frac{\Delta T}{\Delta P} \approx \frac{350-300}{13-1000}; \mu_{JT} \approx -0,051 \frac{K}{bar}$$

Seguidamente se plantean los datos del problema:

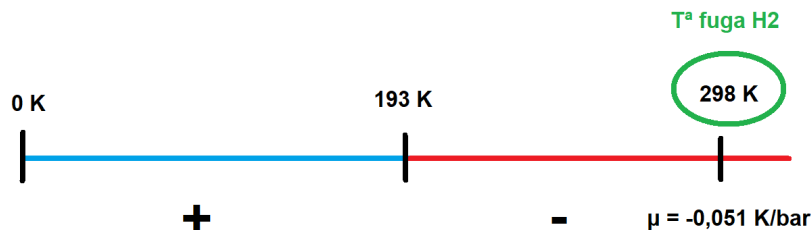


Imagen 17_12: Inversión térmica del hidrógeno y t^a de fuga del tanque

La presión inicial será la de 700 bar (interior del tanque) y la presión final será la expansión a presión atmosférica, por lo que :

$$\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H \text{ siendo } H = Cte \text{ (isoentálpico)} \rightarrow \mu_{JT} = \left(\frac{dT}{dP} \right)_H \text{ e integrando } \rightarrow$$

$$\int_{P_0}^{P_1} \mu_{JT} dP = \int_{T_0}^{T_1} dT ; \mu_{JT} \int_{P_0}^{P_1} dP = \int_{T_0}^{T_1} dT$$

$$\mu_{JT} \cdot (P_1 - P_0) = T_1 - T_0 ; T_1 = \mu_{JT} \cdot (P_1 - P_0) + T_0 ;$$

$$T_1 = -0,051 \cdot (1,01325 - 700) + 298,14$$

$$T_1 = 333,788 \text{ K} = 60,638 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura de auto-ignición del hidrógeno es de 585 °C. Como 60,638 < 585 °C no existe peligro de explosión ante un escape de hidrógeno. Inicialmente se había dicho que una presión del hidrógeno de 1.000 a 13 bar y a una temperatura inicial de 300 K solo aumentaba 50 K. En este caso más concreto, de 700 a 1,013 bar, con una temperatura de inicio de 298 K o 25 °C, la temperatura aumenta hasta los 61 °C prácticamente. Se trata de un incremento de 36 °C.

Por este motivo en las hidrolineras (estaciones de repostaje de hidrógeno para vehículos impulsado por pila de combustible), previamente enfrían el hidrógeno almacenado a 700 bar y posteriormente lo cargan en el vehículo.

Siguiendo con los temas de seguridad, a continuación tiene sentido definir los siguientes conceptos mencionados anteriormente:

- **Difusividad por hidrógeno:** es el deterioro de las propiedades mecánicas que experimentan algunos materiales metálicos debido a la entrada de hidrógeno en su estructura cristalina.



Imagen 17_13: Tubo de aluminio deteriorado por la difusividad del hidrógeno

- **Fragilización por hidrógeno:** es un tipo de corrosión en la cual el gas hidrógeno se difunde en el material y se deposita en la estructura reticular del metal. El hidrógeno sufre una recombinación molecular donde existen defectos y fisuras internas.

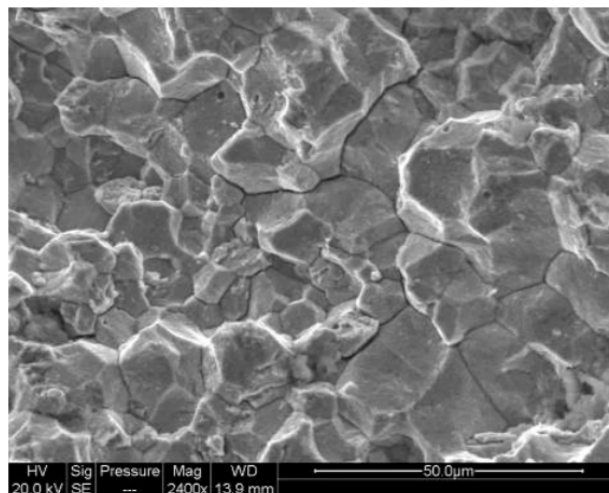


Imagen 17_14: Fisuras por fragilización del hidrógeno en el acero

La reglamentación a la que debe estar sometida cualquier instalación de hidrógeno puede ser a grandes rasgos la que se resume a continuación en la siguiente imagen:

NTP 50: Almacenamiento de hidrógeno



AEN/CTN 181 - Tecnologías del hidrógeno



IEC/TC 105 Fuel cell technologies



ISO/TC 197 Hydrogen technologies



Prevention of fire and explosion risks
<ul style="list-style-type: none"> • ATEX Directive 94/9/EC on equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres • ATEX Directive 1999/92/EC on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres • ATEX Directive 2014/34/EU on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (applicable from 20 April 2016) • Seveso II (Directive 96/82/EC) on prevention of major accidents involving dangerous substances, to be overwritten by Seveso III (Directive 2012/18/EU) on 1.6.2015
Safety of pressure equipment
<ul style="list-style-type: none"> • Directive 97/23/EC on the approximation of the laws of the Member States concerning pressure equipment
Safety of machinery
<ul style="list-style-type: none"> • Machinery Directive 2006/42/EC
Electrical safety
<ul style="list-style-type: none"> • Low Voltage Directive 2006/95/EC • Electromagnetic Compatibility Directive EMC-D 2004/108/EC

Imagen 17_15: Reglamentación sist. de almacenamiento y pilas de combustible

Debido a que aún existen “vacíos legales” y poca regulación en España, se tiene que hacer uso de otros reglamentos como los que se citan a continuación:

- RAP: Reglamento de aparatos a presión.
- RAG: Reglamento de aparatos que usan gas como combustible.
- IPE: Reglamento de instalaciones petrolíferas.
- RIG: Reglamento de instalaciones de gas.
- RCG: Reglamento de distribución y utilización de combustibles gaseosos.

Capítulo 18

18 Conclusiones finales del estudio

En este capítulo se resumen a grandes rasgos todo lo trabajado en la presente memoria con una pequeña reflexión al final en cuanto al sentido de lo estudiado.

Tiempo de lectura 5 min aprox

Los resultados obtenidos tras la realización del TFG esbozan una serie de conclusiones aproximadas a la realidad bastante esclarecedoras respecto al objeto de estudio. Es importante resaltar que si el lector o lectora van directamente a este capítulo sin leer detenidamente los apartados anteriores, no sabrá como se han obtenido los resultados del presente TFG.

Los valores o afirmaciones que se indican a continuación, se han realizado con la máxima rigurosidad que ha permitido la situación, los pocos datos públicos existentes en la web y referencias en libros. Por este motivo es recomendable leer detenidamente todos los apartados y tener presente el origen de las fuentes donde se indican en el apartado 19.

¿Qué conclusiones finales se pueden extraer?. Siguiendo un poco el mismo orden de los capítulos del presente TFG, se puede afirmar que:

- La transición energética es una realidad y el sector de la generación eléctrica tiene un impacto muy considerable en cuanto a la emisión de contaminantes.
- Se ha demostrado que el hidrógeno es un vector energético candidato a descarbonizar sectores completos.
- La Unión Europea y más concretamente España, está tomando medidas y existen más de 95 proyectos relacionados con el hidrógeno.
- Por sus características y recorrido, la isla de El Hierro es idónea para implementar las tecnologías del hidrógeno para descarbonizar su Sistema Eléctrico de Potencia.
- El rendimiento global de la central hidráulica y estación de bombeo está entorno al 66,42%.

- El almacenamiento de combustible existente en la central térmica es de 660 m³ para el diesel oil.
- El Sistema Eléctrico de Potencia de la isla está compuesto por líneas aéreas con apoyos al tresbolillo (59%) y subterráneas (41%).
- Tras la obtención de las pérdidas totales por simulación, los consumos máximos y mínimos, la energía eólica disponible, la proporción de fuentes de energía y microcortes, y calidad en el suministro eléctrico, se ha podido cuantificar la energía de origen fósil para su sustitución por hidrógeno.
- La energía a almacenar en forma de hidrógeno es de 3,6 GWh para un mes.
- El hidrógeno llegaría en barco en forma líquida para ser almacenado en forma de gas en tanques a 700 bar.
- El volumen del tanque será de 2.821 m³.
- El hidrógeno a comprar estaría catalogado como hidrógeno azul.
- La pila de combustible será alcalina (AFC) por su coste, rápida respuesta de potencia eléctrica y madurez en el mercado.
- En 2019 se emitieron solo por generación eléctrica alrededor de 10.000 toneladas de CO₂ a un coste de 141.300 € aproximadamente.
- La infraestructura de hidrógeno puede ser igual de segura que una de gas natural sin ser más peligrosa.
- Existe normativa regulatoria en cuanto a seguridad pero con vacíos donde no llega a impulsar del todo a las tecnologías del hidrógeno.

En cuanto a los objetivos planteados en el primer capítulo, decir que se han trabajado todos con resultados demostrados en los capítulos.

La gran pregunta que todos/as esperan: ¿Tiene sentido el uso del hidrógeno a día de hoy en la isla a esta escala? Las tecnologías del hidrógeno son muy caras pero no por ello significa que no tengan sentido emplearlas, de hecho, es de las pocas tecnologías que pueden permitir almacenar y producir tanta energía. Es por ello, que los apartados 14.3 y 15.3, quizás sean los que den sentido a que en un futuro cercano se puedan integrar como otra tecnologías más en lo cotidiano.

Finalmente alguien puede pensar que no hace falta tanta infraestructura de hidrógeno y que simplemente con un poco de fotovoltaica flotante o un par de aerogeneradores offshore cerca de la isla, sería suficiente para que fuera 100% renovable. En términos de producción de energía, podría aceptarse esta conclusión, pero el problema es mayor, el problema es la gestión y almacenamiento de los recursos renovables inconstantes, por lo que la situación se resolvería parcialmente. A día de hoy en la ingeniería eléctrica, hay que convertir esta problemática en una gran fortaleza.

Capítulo 19

19 Bibliografía y webgrafía

1997 Plan de desarrollo sostenible por el Cabildo de El Hierro.

<https://www.elhierro.es/sostenibilidad>

21 de enero de 2000 la Unesco declara Reserva Mundial de la Biosfera.

<https://www.elhierro.es/post/el-hierro-conmemora-sus-20-a%C3%B1os-como-reserva-mundial-de-la-biosfera>

Septiembre de 2014 Red Europea y global de Geoparques de la Unesco.

https://www.gobiernodecanarias.org/medioambiente/temas/biodiversidad/espacios_protegidos/areas-protegidas-por-instrumentos-internacionales/geoparques/geoparques_canarios/

Isla de El Hierro.

<https://www.elhierro.es/geografia>

<http://www.gobiernodecanarias.org/boc/2003/040/010.html>

https://www.visitarcanarias.com/pozo_de_las_calcosas.php

Power World academic.

<https://www.powerworld.com/solutions/students>

Planes territoriales.

<https://www.gobiernodecanarias.org/energia/temas/planificacion/planesterritoriales/elhierro.html>

Infraestructura eléctrica.

https://www.canarias7.es/hemeroteca/el_cabildo_herreno_lleva_a_cabo_el_soterramiento_de_lineas_electricas-BDCSN91440

<http://www.gobiernodecanarias.org/boc/archivo/2003/040/pda/010.html>

<https://www.boe.es/boe/dias/2009/08/17/pdfs/BOE-A-2009-13612.pdf>

<http://www.arquihuelva.es/images/documentos/normativa-tecnica/endesa/02-documentos-referencia/02-04-especificaciones-tecnicas-materiales/6701802.pdf>

<https://www.bronmetal.com/wp-content/uploads/2019/12/cable-aluminio-bronmetal.pdf>

<https://es.prysmiangroup.com/MediaTension-Al-Voltalene-H-Compact-AL-RH5Z1>

Proyecto tipo Endesa Línea Aérea media tensión.

<https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/lineas-alta-tension/Documents/proyectos-vigentes-anulados/endesa/AYZ10000.pdf>

Cálculo parte inductiva (L) de la línea.

<http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc24.php>

Instituto Nacional de Estadística, Instituto Canario de Estadística y Foro - Ciudad.

<https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaDesdeHome&nombrePoblacion=Valverde&x=5&y=11>

<http://www.gobiernodecanarias.org/istac/estadisticas/demografia/poblacion/cifraspadronales/E30245A.html>

<https://www.foro-ciudad.com/tenerife.html>

Central hidroeléctrica.

<https://www.cienciacanaria.es/central-hidroelica>

<https://www.efeverde.com/noticias/las-claves-del-proyecto-de-la-central-hidroelica-de-el-hierro/>

https://www.spancold.org/wp-content/uploads/2018/05/20180425_JPYEH_Jose_Luis_Palencia_Ortega.pdf

<http://www.goronadelviento.es/interactivo/>

<https://www.idae.es/central-hidro-eolica-de-el-hierro-gorona-del-viento-el-hierro-sa-el-hierro>

https://books.google.es/books?id=pabWCwAAQBAJ&pg=PA458&lpg=PA458&dq=ANDRITZ+HYDRO+PELTON+2.83MW&source=bl&ots=ULuBe6fSN0&sig=ACfU3U1QxWAK-F3msDYE G01450THjX7_zA&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjEp8vfpu7sAhXQilwKHaCYDVCQ6AEwAXoECAcQAq#v=onepage&q=ANDRITZ%20HYDRO%20PELTON%202.83MW&f=false

https://hybridpowersystems.org/wp-content/uploads/sites/9/2018/05/1_2_036_presentation_Marrero_Agustin.pdf

https://regridintegrationindia.org/wp-content/uploads/sites/14/2019/12/10B_1_RE_India19_Hybrid_Power_Thomas_Ackermann_FINAL.pdf

https://www.lalibreria.upv.es/portalEd/UpvGStore/products/p_6606-1-1

http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28690/maquinas_electricas_cap07.pdf?sequence=20&isAllowed=y

<https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/S3-P2-Piernavieja-PPTACC.pdf>

<https://unitecno.es/portfolio-items/gorona-del-viento/>

https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27630/TFG_Andres_Gallego_Yuste_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Central Térmica Llanos Blancos.

<https://www.endesa.com/content/dam/endesa-com/home/sostenibilidad/medioambiente/gestionambiental/documentos/2018/Declaraci%C3%B3n%20medioambiental%20UNELCO%20CE%20LLANOS%20BLANCOS%20firmado.pdf>

http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90517/fichero/TFG_Pilar+Bautista+Sim%C3%B3n.pdf

Hydrogen storage and compression.

https://www.researchgate.net/publication/313704619_Hydrogen_storage_and_compression?enrichId=rgreq-d2da9ba574c5befe64680233a13e9d58-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMxMzcwNDYxOTtBUzo0NjE3Njg5MzkwNTMwNTdAMTQ4NzEwNTcwMjQwNQ%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf

https://www.sintef.no/globalassets/project/hyper/presentations-day-2/day2_1105_decker_liquid-hydrogen-distribution-technology_linde.pdf

Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

<https://www.insst.es/documents/94886/203536/Gu%C3%ADa+T%C3%A9cnica+para+la+evaluaci%C3%B3n+y+prevenci%C3%B3n+de+los+riesgos+derivados+de+atm%C3%B3sferas+explosivas+en+el+lugar+de+trabajo/d54dcb4f-2814-4b12-a591-ba9be3b4b0da>

Clasificación de áreas con riesgo de atmósferas explosivas (atex): gases, vapores y nieblas inflamables.

[https://www.insst.es/documents/94886/362212/Clasificaci%C3%B3n+de+%C3%A1reas+con+riesgo+de+atm%C3%B3sferas+explosivas+\(ATEX\)+gases,+vapores+y+nieblas+inflamables.+Poster+t%C3%A9cnico.+A%C3%B1o+2009](https://www.insst.es/documents/94886/362212/Clasificaci%C3%B3n+de+%C3%A1reas+con+riesgo+de+atm%C3%B3sferas+explosivas+(ATEX)+gases,+vapores+y+nieblas+inflamables.+Poster+t%C3%A9cnico.+A%C3%B1o+2009)

National Aeronautics and Space Administration Report, Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems, Report NSS 1740.16, 1997, p. A-16.

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f11/871916.pdf>

Perry, J.H., Chemical Engineers' Handbook, 4th Ed., Figure 3-28, 1963, McGraw-Hill Book Co.

<https://chembugs.files.wordpress.com/2015/12/perrys-chemical-engineering-handbook1.pdf>

Handbook of Hydrogen Storage. Edited by Michael Hirscher 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-32273-2.

https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527322736_c01.pdf

THEORETICAL STUDY OF JOULE - THOMSON COEFFICIENT by Mohammad Riazasd.

https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/175310/Riaz_10781077.pdf?sequence=1&isAllowed=y

JOULE-THOMSON INVERSION CURVES AND RELATED COEFFICIENTS FOR SEVERAL SIMPLE FLUIDS by Robert C. Hendricks, Ildiko C. Peller, and Anne K. Baron Lewis Research Center Cleveland, Ohio 44135 .. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION WASHINGTON, D. C. JULY 1972A.

<https://core.ac.uk/download/pdf/80646313.pdf>

2nd Joint Summer School on Hydrogen and Fuel Cell Technologies 19 September 2012, Crete Hazards related to hydrogen properties and comparison with other fuels 2012 Vladimir Molkov.

http://www.hysafe.org/science/eAcademy/JSSFCH/JSSFCH2012/MolkovVV_HazardsRelatedToHydrogenPropertiesAndComparisonWithOtherFuels.pdf

Consumo medio hogares REE.

https://www.ree.es/sites/default/files/interactivos/como_consumimos_electricidad/como-varia-mi-consumo.html

Consumo REE 01/10/20.

<https://es.mathworks.com/mwaccount/profiles/reverify/05lwdq3?uri=https%3A%2F%2Fes.mathworks.com%2Fcampaigns%2Fproducts%2Ftrials.html>

Aerogeneradores.

https://www.thewindpower.net/turbine_es_5_enercon_e70-2300.php

Potencia instantánea.

<https://sites.google.com/site/analisisdecircuitosupaep/analisis-de-potencia-en-ca/3-1-potencia-instantanea-y-promedio>

Diferentes noticias actuales como contexto.

https://www.elconfidencial.com/empresas/2020-09-24/planta-hidrogeno-verde-iberdrola-bra_2736067/

https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20200916/talgo-presenta-sistema-trenes-hidrogeno-espana-sustitutos/521198724_0.html

https://www.elespanol.com/invertia/empresas/energia/20201102/hidrogeno-camino-convertir-energeticas-estrellas-mercados/532447271_0.html

http://www.aeh2.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=44&Itemid=41&lang=es

<http://apilados.com/blog/el-hidrogeno-como-gas-real-factor-de-compresibilidad/>

Sistemas de energía eléctrica por Barrero González, Fermín.

<https://books.google.com.co/books?id=wZoyiFKf5lKc&printsec=frontcover>

Tasas por emisiones de GEI.

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/es_final_necp_main_es.pdf

<https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-spain.pdf>

<https://www.oecd.org/tax/tax-policy/taxing-energy-use-spain.pdf>

<https://www.oecd.org/tax/tax-policy/brochure-taxing-energy-use-2019.pdf>

Panorama Nacional y Europeo.

<https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/hidrogeno-vector-energetico-de-una-economia-descarbonizada/>

https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento_tcm30-522655.pdf

http://www.ptehpc.org/index.php?option=com_content&view=article&id=148&Itemid=182

https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2018/sep/irena_hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf

https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2018.pdf

https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/P2H_Full_Study_FCHJU.pdf

Otros enlaces.

<https://www.aeh2.org/hidrogeno/>

<https://norwaytoday.info/news/hydrogen-station-fire-sandvika/>

<https://sanfrancisco.cbslocal.com/2012/05/04/hydrogen-leak-in-emeryville-prompts-evacuations/>

<https://www.sensorland.com/PDF/ATEX-Zones-And-Equipment-Categories.pdf>

<https://prevencion.fremap.es/Buenas%20prcticas/ME.TRI.123.pdf>

<https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/56315/1/Garikoitz%20Artola.pdf>

http://www.hysafe.org/science/eAcademy/docs/3rdesshs/presentations/ESSHS2008Newholm_eG_DonnelyP.pdf

http://platea.pntic.mec.es/alabarta/CVE/Soporte/Materiales/tipos_designacion_cables.pdf

<https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-130036/documento-oferta-tecnica.pdf>

https://docs.wixstatic.com/ugd/3e4354_18a06922a82a49f4ad6299a9d767d2c3.pdf?index=true

<https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/especial/2020/01/la-transicion-energetica-se-apunta-otro-tanto-caen-las-emisiones-a-un-minimo-historico>

<https://gacetamedica.com/investigacion/la-calidad-del-aire-provoco-la-muerte-de-30-000-personas-en-espana-en-2019/>

<https://demcopem-2mw.eu/worlds-first-2mw-pem-fuel-cell-power-plant/>

<https://demcopem-2mw.eu/>

<https://www.theguardian.com/science/blog/2013/jul/19/sweet-hydrogen-sugar-energy-needs>

<https://www.youtube.com/watch?v=BA9gGDjvaMs>

https://www.youtube.com/watch?v=B_xyO2O0Q-Q

<https://www.youtube.com/watch?v=-Nfp1pM5YLk>

<https://www.todoexpertos.com/categorias/ciencias-e-ingenieria/respuestas/301302/obtencion-de-hidrogeno-desde-agua>

<https://elperiodicodelaenergia.com/el-coste-del-hidrogeno-verde-debe-caer-a-la-mitad-para-que-sea-competitivo-con-el-azul-la-nuclear-y-su-alto-factor-de-capacidad-serian-claves/>

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/hydrogen-production-costs-using-natural-gas-in-selected-regions-2018-2>

<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-average-levelised-cost-of-hydrogen-production-by-energy-source-and-technology-2019-and-2050>