



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIERÍA  
INDUSTRIAL VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

# **ANÁLISIS DE FALLOS EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA CRIOGÉNICA DE GNL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROACT**

AUTORA: Carla Escuder Galiano

TUTORA: Irene del Canto Serrano

**Curso Académico: 2019-20**

## **RESUMEN**

Con el avance de las nuevas tecnologías, la mayoría de los procesos productivos han pasado de ser procesos manuales a procesos automatizados. En consecuencia, los equipos son cada vez más complejos y por tanto localizar el fallo se ha convertido en un proceso tedioso y lleno de dificultades. En muchas ocasiones, los problemas se resuelven sin encontrar las causas que los han producido, por lo que en un futuro estos problemas vuelven a ocurrir y se deberá invertir tiempo innecesario para solucionarlo.

Por el contrario, actualmente existen distintas herramientas que ayudan a resolver los grandes problemas de la industria actual. Estas herramientas contribuyen a hallar las causas reales por las cuales ocurre un fallo y atacarlas desde la raíz, y no atacar de forma superficial sus síntomas.

En base a esta línea, se plantea dentro de una planta de regasificación de gas natural licuado (GNL) el desarrollo de un análisis causa raíz mediante la metodología PROACT para conocer las causas potenciales que produjeron el fallo de un equipo de bombeo primario situado en uno de los cuatro tanques de almacenamiento de gas que dispone la instalación.

Para llevar a cabo este análisis, se ha realizado un examen exhaustivo de todas las variables de proceso y agentes externos e internos que afecten al proceso productivo del equipo a partir de los recursos disponibles en la planta. Con ello se ha conseguido conocer las causas principales del fallo y se han propuesto acciones correctivas para evitar que este mismo fallo se produzca en equipos similares.

En conclusión, la aplicación de esta metodología mejora la eficiencia del proceso productivo puesto que se reduce la frecuencia de fallo de los equipos, y supone un gran ahorro económico ya que a partir de este estudio la organización se puede anticipar a posibles fallos.

**Palabras clave:** Mantenimiento, Gas natural, Energías, Análisis de Problemas, Metodología PROACT, Árbol lógico, Causa, Fallo, Análisis Causa Raíz.



## RESUM

Amb l'avanç de les noves tecnologies, la majoria dels processos productius han passat de ser processos manuals a processos automatitzats. En conseqüència, els equips són cada vegada més complexos i per tant localitzar la fallada s'ha convertit en un procés tediós i ple de dificultats. En moltes ocasions, els problemes es resolen sense trobar les causes que els han produït, de manera que en un futur aquests problemes tornen a ocórrer i s'haurà invertir temps innecessari per solucionar-ho.

Per contra, actualment existeixen diferents eines que ajuden a resoldre els grans problemes de la indústria actual. Aquestes eines contribueixen a trobar les causes reals per les quals passa una fallada i atacar-les des de l'arrel, i no atacar de forma superficial seus símptomes.

En base a aquesta línia, es planteja dins d'una planta de regasificació de gas natural líquid (GNL) el desenvolupament d'un anàlisi causa arrel mitjançant la metodologia PROACT per conèixer les causes potencials que van produir la fallada d'un equip de bombament primari situat en un dels quatre tancs d'emmagatzematge de gas que disposa la instal·lació.

Per dur a terme aquest anàlisi, s'ha realitzat un examen exhaustiu de totes les variables de procés i agents externs i interns que afectin el procés productiu de l'equip a partir dels recursos disponibles a la planta. Amb això s'ha aconseguit conèixer les causes principals de la decisió i s'han proposat accions correctives per evitar que aquest mateix error es produeixi en equips similars.

En conclusió, l'aplicació d'aquesta metodologia millora l'eficiència del procés productiu ja que es redueix la freqüència de fallada dels equips, i suposa un gran estalvi econòmic ja que a partir d'aquest estudi l'organització es pot anticipar a possibles problemes.

**Paraules clau:** Manteniment, Gas natural, Energies, Anàlisi de Problemes, Metodologia PROACT, Arbre lògic, Causa, Fallada, Anàlisi Causa Arrel.



## **ABSTRACT**

With the development of new technologies, most production processes have gone from manual processes to automated processes. As a result, equipment is becoming increasingly complex, and locating the fault has therefore become a tedious and difficult process. In many cases, problems are solved without finding the causes that have caused them, so in the future these problems will reoccur and unnecessary time must be invested to solve it.

On the contrary, there are currently different tools that help solve the great problems of today's industry. These tools help find out the real causes of failure and attack them from the root, and not superficially attack your symptoms.

Based on this line, the development of a root cause analysis using the PROACT methodology was established within a liquefied natural gas (LNG) regasification plant to know the potential causes that caused the failure of a primary pumping equipment located in one of the four gas storage tanks that the facility has.

To carry out this analysis, an exhaustive examination of all the process variables and external and internal agents that affect the production process of the equipment has been carried out based on the resources available in the plant. With this, it has been possible to know the main causes of the failure and corrective actions have been proposed to prevent this same failure from occurring in similar equipment.

In conclusion, the application of this methodology improves the efficiency of the production process since the frequency of equipment failure is reduced, and represents a great economic saving since, from this study, the organization can anticipate possible failures.

**Key words:** Maintenance, Natural gas, Energies, Problem Analysis, PROACT Methodology, Logical tree, Cause, Failure, Root Cause Analysis.



# **ÍNDICE GENERAL**

## **Documento I. MEMORIA**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>2</b>
<b>3. MOTIVACIÓN DEL ANÁLISIS .....</b>	<b>3</b>
<b>4. MANTENIMIENTO.....</b>	<b>4</b>
4.1. HISTORIA DEL MANTENIMIENTO.....	4
4.1.1. EVOLUCIÓN .....	4
4.1.2. DEFINICIÓN.....	5
4.1.3. CONCEPTOS.....	5
4.1.3.1. Sistemas de producción .....	5
4.1.3.2. Fallos.....	6
4.1.3.3. Operaciones y mantenimiento.....	7
4.1.4. TIPOS DE MANTENIMIENTO.....	7
4.2. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO.....	8
4.2.1. INTRODUCCIÓN .....	8
4.2.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.....	9
4.2.3. JERARQUIZACIÓN DE EQUIPOS .....	9
4.2.4. ANÁLISIS DE PUNTOS DÉBILES.....	10
4.2.5. PLANES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y RECURSOS ASOCIADOS ....	10
4.2.6. PROGRAMACIÓN MANTENIMIENTO y OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS .....	11
4.2.7. EVALUACIÓN Y CONTROL.....	11
4.2.8. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS EQUIPOS.....	11
4.2.9. IMPLANTACIÓN DEL PROCESO DE MEJORA CONTINUA .....	12
<b>5. ANÁLISIS DE PROBLEMAS .....</b>	<b>13</b>
5.1. DEFINICIÓN DE PROBLEMAS.....	13
5.2. METODOLOGÍAS PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS .....	14
5.3. TÉCNICAS DE ARBOL .....	15
5.3.1. MANAGEMENT OVERSIGHT AND RISK TREE (MORT).....	15

5.3.2.	SAVANNAH RIVER PLANT .....	15
5.3.3.	CAUSAL TREE METHOD .....	16
5.4.	TÉCNICAS DE CHEQUEO .....	17
5.4.1.	SYSTEMATIC CAUSE ANALYSIS TECHNIQUE .....	17
5.4.2.	SYSTEMATIC ACCIDENT CAUSE ANALYSIS .....	17
5.4.3.	TECHNIQUE OF OPERATIONS REVIEW .....	18
5.5.	OTRAS TÉCNICAS.....	18
5.5.1.	CINCO POR QUÉS.....	18
5.5.2.	DIAGRAMA ISHIKAWA.....	19
5.5.3.	METODOLOGÍA PROACT.....	20
<b>6.</b>	<b>MÉTODO “ANÁLISIS CAUSA RAIZ” .....</b>	<b>21</b>
6.1.	INTRODUCCIÓN .....	21
6.1.1.	DEFINICIÓN DE ACR.....	21
6.1.2.	CONCEPTOS CLAVE.....	21
6.2.	VENTAJAS .....	23
6.3.	PROCEDIMIENTO .....	23
6.3.1.	INTRODUCCIÓN .....	23
6.3.2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	25
6.3.2.1.	¿Qué? ¿Cuándo? ¿Donde? .....	25
6.3.2.2.	Equipo de Trabajo .....	25
6.3.3.	DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	26
6.3.3.1.	Situación e historia de la instalación .....	26
6.3.3.2.	Diagrama de proceso .....	26
6.3.3.3.	Contexto operacional .....	26
6.3.4.	JERARQUIZACIÓN DE PROBLEMAS.....	26
6.3.4.1.	Cuantificación del impacto.....	26
6.3.4.2.	Análisis de criticidad.....	27
6.3.4.3.	Valoración del riesgo económico .....	29
6.3.5.	DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS RAÍCES.....	29
6.3.5.1.	Modos de fallo.....	30
6.3.5.2.	Hipótesis.....	31
6.3.5.3.	Tipos de causas: física, humana y latente .....	31

6.3.6.	IMPLANTACIÓN DE SOLUCIONES .....	32
6.3.6.1.	Selección de las soluciones .....	32
6.3.6.2.	Efectividad de las soluciones.....	33
6.3.6.3.	Lecciones aprendidas .....	33
<b>7.</b>	<b>APLICACIÓN DEL MÉTODO “ANÁLISIS CAUSA RAIZ” .....</b>	<b>34</b>
7.1.	INTRODUCCIÓN.....	34
7.2.	ANTECEDENTES.....	34
7.3.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	36
7.3.1.	¿QUÉ? ¿CUANDO? ¿DONDE? .....	36
7.3.2.	EQUIPO DE TRABAJO .....	36
7.4.	DEFINICIÓN DEL SISTEMA .....	37
7.4.1.	SITUACIÓN E HISTORIA DE LA INSTALACIÓN.....	37
7.4.1.1.	Situación .....	37
7.4.1.2.	Historia de la instalación .....	37
7.4.2.	DEFINICIÓN Y DIAGRAMA DE PROCESO .....	38
7.4.2.1.	Definición del proceso productivo .....	38
7.4.2.2.	Definición del proceso de almacenamiento del producto .....	39
7.4.2.3.	Diagrama de proceso del equipo .....	40
7.4.3.	CONTEXTO OPERACIONAL.....	41
7.4.3.1.	Filosofía Operacional.....	41
7.4.3.2.	Datos de diseño de la bomba .....	43
7.5.	JERARQUIZACIÓN DEL PROBLEMA .....	44
7.5.1.	ANÁLISIS DEL IMPACTO .....	44
7.5.2.	VALORACIÓN DE LA PÉRDIDA OCASIONADA.....	45
7.6.	DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS RAÍCES .....	46
7.6.1.	ANÁLISIS PREVIOS .....	46
7.6.2.	DEFINICIÓN Y PRIORIZACIÓN DE MODOS DE FALLO .....	48
7.6.3.	DEFINICIÓN Y VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS.....	48
7.6.3.1.	Definición de las hipótesis.....	48
7.6.3.2.	Desarrollo de las hipótesis .....	52
7.6.3.3.	Validación de hipótesis.....	61
7.6.4.	DEFINICIÓN Y VALIDACIÓN DE CAUSAS RAICES .....	63

7.6.4.1. Causa Raíz Física 1 .....	64
7.6.4.2. Causa Raíz Física 2 .....	64
7.6.4.3. Causa Raíz Física 3 .....	65
7.6.4.4. Causa Raíz Latente 1.....	65
7.6.4.5. Causa Raíz Latente 2.....	70
7.7. IMPLANTACIÓN DE SOLUCIONES.....	70
7.7.1. SELECCIÓN DE LAS ACCIONES CORRECTIVAS .....	70
7.7.2. IMPLANTACIÓN DE LAS ACCIONES CORRECTIVAS .....	72
7.7.3. LECCIONES APRENDIDAS.....	72
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>73</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>74</b>

## Documento II. PRESUPUESTO

<b>1. PLANIFICACIÓN DE RECURSOS .....</b>	<b>76</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	76
1.2. LISTA DE MATERIALES Y CANTIDADES .....	76
1.1.1. HARDWARE .....	76
1.1.2. SOFTWARE.....	77
1.1.3. RECURSOS HUMANOS.....	77
1.3. FASES DEL PROYECTO .....	78
<b>2. PRESUPUESTO .....</b>	<b>80</b>
2.1. TABLAS DE PRECIOS UNITARIOS .....	80
2.1.1. SOFTWARE.....	80
2.1.2. HARDWARE .....	80
2.1.3. RECURSOS HUMANOS.....	81
2.2. PRESUPUESTOS PARCIALES.....	81
2.2.1. HARDWARE .....	81
2.2.2. SOFTWARE.....	82
2.2.3. RECURSOS HUMANOS.....	82
2.3. PRESUPUESTO TOTAL .....	83

2.3.1.	COSTE TOTAL.....	83
2.3.2.	PRESUPUESTO DE LOS SERVICIOS CONTRATADOS .....	83
2.3.3.	ANÁLISIS DE COSTES Y TIEMPO .....	84

## **Documento II. PRESUPUESTO**

<b>ANEXO 1: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO 2: CURVAS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO 3: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN 21FT04005A .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO 4: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN 21FT04005B .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO 5: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN 21FV04005 .....</b>	<b>91</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Definición de eficacia	6
Figura 2. Definición de disponibilidad	6
Figura 3. Fases de la gestión del mantenimiento	8
Figura 4. Herramientas para la gestión del mantenimiento	8
Figura 5. Cuadro de mandos integral	9
Figura 6. Matriz de criticidad	10
Figura 7. Factores de los problemas	13
Figura 8. Metodologías para la identificación de causas raíces	14
Figura 9. Técnica 5 por que's	19
Figura 10. Diagrama Ishikawa	19
Figura 11. Procedimiento análisis causa raíz	24
Figura 12. Valoración de la frecuencia de fallo	28
Figura 13. Ponderación análisis de criticidad	28
Figura 14. Matriz de criticidad	29
Figura 15. Árbol lógico	30
Figura 16. Ejemplo Modos de fallo para un problema	30
Figura 17. Ejemplo Hipótesis para un problema	31
Figura 18. Tipos de causas	32
Figura 19. Planta de Regasificación GNL	34
Figura 20. Parte superior de la bomba 21-P-04B	35
Figura 21. Daños en el impulsor 1	35
Figura 22. Daños en el impulsor 2	35
Figura 23. Etapa 1	35
Figura 24. Esquirlas en etapa 3	35
Figura 25. Accionistas de la organización	37
Figura 26. Evolución de la instalación	38
Figura 27. Proceso productivo	39
Figura 28. Proceso de almacenamiento del gas natural	40

Figura 29. Diagrama de proceso de una bomba primaria	41
Figura 30. Situación del equipo dentro del tanque	42
Figura 31. Bomba centrífuga sumergida	43
Figura 32. Análisis de criticidad del equipo	44
Figura 33. Matriz de criticidad SAGGAS	44
Figura 34. Valoración del coste de la reparación	45
Figura 35. Curvas DCS instante del fallo	46
Figura 36. Comparación entre curva esperada y real	47
Figura 37. Curvas de la caída de la presión	47
Figura 38. Modos de fallo (Árbol lógico)	48
Figura 39. Definición del método de verificación de hipótesis	50
Figura 40. Árbol lógico completo	51
Figura 41. Nivel del tanque 2011	52
Figura 42. Nivel del tanque 2012	52
Figura 43. Nivel del tanque 2013	52
Figura 44. Nivel del tanque 2014	52
Figura 45. Nivel del tanque 2015	53
Figura 46. Nivel del tanque 2016	53
Figura 47. Nivel del tanque 2017	53
Figura 48. Nivel del tanque 2018	53
Figura 49. Datos de las horas de operación del equipo	53
Figura 50. Resumen horas de operación 2018	54
Figura 51. Densidad GNL 2011	55
Figura 52. Densidad GNL 2012	55
Figura 53. Densidad GNL 2013	55
Figura 54. Densidad GNL 2014	55
Figura 55. Densidad GNL 2015	55
Figura 56. Densidad GNL 2016	55
Figura 57. Densidad GNL 2017	55
Figura 58. Densidad GNL 2018	55

Figura 59. Lista de eventos de vibraciones	59
Figura 60. Caída de presión observada en el sistema de vibraciones	59
Figura 61. Evento de severidad 4 registrado el 17 de mayo	59
Figura 62. Comparación de los valores de los enclavamientos	60
Figura 63. Tabla de validación de hipótesis	61
Figura 64. Árbol lógico con hipótesis validadas	62
Figura 65. Causas raíces del problema	63
Figura 66. Procedimientos de análisis causas raíces	64
Figura 67. Evolución del caudal de operación	66
Figura 68. Caudal de operación del equipo durante el año 2011	66
Figura 69. Caudal de operación del equipo durante el año 2012	67
Figura 70. Caudal de operación del equipo durante el año 2013	67
Figura 71. Caudal de operación del equipo durante el año 2014	68
Figura 72. Caudal de operación del equipo durante el año 2015	68
Figura 73. Caudal de operación del equipo durante el año 2016	69
Figura 74. Caudal de operación del equipo durante el año 2017	69
Figura 75. Caudal de operación del equipo durante el año 2018	70
Figura 76. Análisis de las acciones correctivas	72
Figura 77. Presupuesto planificado	84
Figura 78. Presupuesto recursos humanos por fases	84

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Descripción recursos hardware .....	76
Tabla 2. Descripción recursos software.....	77
Tabla 3. Descripción recursos humanos .....	77
Tabla 4. Diagrama de Gantt .....	79
Tabla 5. Precios unitarios software .....	80
Tabla 6. Precios unitarios hardware .....	80
Tabla 7. Precios unitarios recursos humanos .....	81
Tabla 8. Presupuesto parcial hardware .....	81
Tabla 9. Presupuesto parcial software .....	82
Tabla 10. Presupuesto parcial recursos humanos.....	82
Tabla 11. Coste total .....	83
Tabla 12. Presupuesto de los servicios contratados.....	83



# Documento I. **MEMORIA**



## 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto presenta la aplicación de un Análisis Causa Raíz mediante la metodología PROACT para identificar las diferentes causas que provocaron la pérdida de presión de la bomba centrífuga criogénica instalada en uno de los cuatro tanques de la planta de Regasificación de gas situada en el Puerto de Sagunto (SAGGAS).

Para ello, se ha realizado un análisis completo sobre la metodología y cómo se desarrolla desde un punto de vista teórico. Posteriormente se ha llevado a cabo la aplicación práctica de dicha metodología. A partir de esta aplicación, se han identificado las causas potenciales que provocaron la pérdida de presión en dicho equipo y se han definido diferentes acciones correctoras para evitar futuros problemas en equipos similares.

En resumen, la aplicación de esta metodología contribuye a la resolución total del problema actuando sobre la causa principal de éste y así conseguir reducir la frecuencia de fallos del equipo. Todo ello supone un gran ahorro económico para la empresa y mejora a la hora de resolver futuros problemas.

## 2. OBJETIVO

El principal objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es la aplicación de la metodología PROACT para la realización del Análisis Causa Raíz con el fin de identificar las causas raíces o primarias de los problemas que surgen en cualquier equipo o instalación de la planta, ya que, descubriendo este tipo de fallos, se puede prevenir su recurrencia o aparición en ese mismo equipo o similares.

Además, la aplicación de esta metodología de una forma sistemática y con criterios generalizados para toda la planta genera los siguientes beneficios, los cuales se consideran objetivos específicos de la aplicación de dicha metodología:

1. Mejora la eficiencia de los procesos debido a la prevención de problemas e incremento en la confiabilidad de equipos e instalaciones
2. Reducción de los costes de mantenimiento correctivo puesto que se identifican los modos de fallo crónicos
3. Planificación proactiva de las actividades de mantenimiento en base a los resultados obtenido del análisis realizado
4. Posibilidad de dedicar y enfocar esfuerzos en la optimización
5. Desarrollo de oportunidades en lugar de actitudes reactivas
6. Mejorar la comunicación de las lecciones aprendidas sobre los problemas anteriores
7. Reducción de la frecuencia de fallo de los equipos

### 3. MOTIVACIÓN DEL ANÁLISIS

El origen de este Trabajo Fin de Máster tiene lugar a raíz de las prácticas realizadas por la autora del presente trabajo en la planta de regasificación de gas natural licuado situada en el puerto de Sagunto desde principio de septiembre del 2018 hasta finales de septiembre de 2019. La experiencia de 13 meses se desarrolló en el departamento de mantenimiento de la instalación; y posteriormente a estas prácticas, la alumna fue contratada durante un año para seguir desarrollando las acciones derivadas del proyecto.

Durante las prácticas, desde la dirección, se planteó a la alumna coordinar y aplicar la metodología Análisis Causa Raíz para conocer las causas principales que produjeron el fallo en uno de los equipos de bombeo primario instalados en el proceso productivo de la instalación.

En base a las necesidades de la planta, se decide aplicar la metodología PROACT para realizar al Análisis Causa Raíz ya que a partir de él se implementa un árbol lógico que permite analizar todos aquellos posibles modos de fallo que hayan producido el problema. Para ello, se realiza un análisis completo sobre la metodología a aplicar estudiando en qué consiste y cómo se desarrolla desde un punto de vista teórico. Posteriormente, se llevará a cabo la aplicación práctica al problema sufrido por uno de los tres equipos de bombeo primario situado en el tanque número cuatro de la instalación.

En resumen, la principal motivación del desarrollo de este Trabajo Fin de Máster es conocer las principales causas que produjeron el fallo de la bomba y la aplicación práctica de esta metodología estudiada durante los cursos anteriores.

## 4. MANTENIMIENTO

### 4.1. HISTORIA DEL MANTENIMIENTO

#### 4.1.1. EVOLUCIÓN

Hasta la década de 1980 la industria en gran parte de los países occidentales tenía un objetivo bien definido, obtener la máxima rentabilidad para una inversión. No obstante, con la inserción de la industria orientada en el mercado occidental, el consumidor pasó a ser considerado un elemento importante en las adquisiciones, es decir, exigir calidad en los productos y en los servicios suministrados. Esta demanda de “calidad” hizo que las empresas considerasen ese factor como una necesidad para mantenerse competitivas tanto en mercados nacionales como internacionales.

En 1975, la Organización de las Naciones Unidas definía la actividad final de cualquier entidad organizada como “Producción = Operación + Mantenimiento”. Donde al segundo factor de este binomio se le atribuían las siguientes responsabilidades:

1. Reducción de tiempo de paralización de los equipos que afectan la operación.
2. Reparación de los daños que reducen el potencial de ejecución de los servicios.
3. Garantía de funcionamiento de las instalaciones de forma que los productos o servicios satisfagan los criterios de calidad establecidos y estándares.

La historia del mantenimiento acompaña el desarrollo técnico industrial de la humanidad. A finales del siglo XIX, con la mecanización de las industrias surgió la necesidad de las primeras reparaciones, estas eran ejecutadas por el mismo grupo de persona que se dedicaba a la operación de la maquinaria.

Con la llegada de la Primera Guerra Mundial y la implantación de la producción en serie, las industrias establecieron programas mínimos de producción y a consecuencia de ello, percibieron la necesidad de formar un equipo encargado de las reparaciones con el objetivo de que las máquinas estuvieran paradas el menor tiempo posible. Por consiguiente, surgió en la mayoría de las industrias un órgano que dependía del grupo de operación cuyo principal objetivo era el mantenimiento correctivo.

Esta situación se mantuvo hasta la década de 1930, ya que fue en ese momento cuando surgió la necesidad de aumentar la rapidez de en la producción. La administración de las industrias pasó a preocuparse no solamente en corregir las averías producidas en las máquinas sino también de evitar que ocurrieran esas averías. Por esta razón, el personal dedicado al mantenimiento dejó de depender del órgano de operación y ambos estaban situados al mismo.

Alrededor de la década de los 50, la industria se desarrolló para satisfacer los esfuerzos de la Posguerra. Los gerentes de mantenimiento detectaron que en muchas ocasiones el tiempo empleado para diagnosticar los fallos era mayor que el tiempo empleado en la reparación de las averías. Por esa razón, el órgano dedicado al mantenimiento se dividió en dos grupos, uno de ellos especializado en el asesoramiento y diagnóstico de fallos encargado de controlar el mantenimiento preventivo y otro grupo dedicado a la reparación de las averías.

Alrededor de 1960, el grupo dedicado a la ingeniería de mantenimiento empezó a desarrollar criterios de predicción y previsión de fallos con el objetivo de optimizar el desempeño de los grupos de ejecución del mantenimiento. El criterio de mantenimiento predictivo fue asociado a métodos de planificación y control automatizados. Por consiguiente, el grupo dedicado a la ingeniería del mantenimiento se dividió en dos subgrupos. Uno de ellos dedicado al estudio de los fallos crónicos y el otro dedicado a la planificación y control del mantenimiento.

A partir de la década de los 80, en consecuencia al desarrollo de los ordenadores personales con costes reducidos, los grupos dedicados al mantenimiento empezaron a desarrollar y procesar sus propios programas con el objetivo de eliminar la dependencia de disponibilidad humana y de equipos. Además se centralizó toda la información en un ordenador lo que facilitaba la comunicación de las necesidades hacia el analista de sistemas.

Estas etapas evolutivas del mantenimiento industrial se caracterizaron por la reducción de costes, por la garantía de la calidad debida a la confiabilidad y productividad de los equipos y cumplimiento de los tiempos de ejecución.

Los responsables del mantenimiento pasaron a ser más exigidos en la atención adecuada de los clientes puesto que se manifiestan de forma directa o indirecta en el producto o servicio que la empresa ofrece a sus clientes. Hoy en día, una organización corporativa es vista como una cadena de varios eslabones donde el órgano de mantenimiento es uno de los de mayor importancia en los resultados de la empresa.

#### 4.1.2. DEFINICIÓN

El mantenimiento industrial se define como un conjunto de normas y técnicas establecidos para el mantenimiento de la maquinaria e instalaciones de una planta con el fin de proporcionar un mejor rendimiento en el menor tiempo posible.

Según la norma UNE EN 13306 el mantenimiento es la “Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y gerenciales durante el ciclo de vida de un ítem con el fin de mantenerlo, o restaurarlo, a un estado en el cual pueda desempeñar la función requerida”.

#### 4.1.3. CONCEPTOS

En este apartado se describen tres conceptos clave en el estudio del mantenimiento en cualquier tipo de instalación o equipo.

##### 4.1.3.1. Sistemas de producción

Un sistema de producción es un conjunto de elementos organizados, relacionados y que interactúan entre ellos. Ese conjunto está formado por los equipos, las personas, los materiales y los procedimientos a seguir.

Se puede afirmar que un sistema de producción es eficaz cuando muestra su aptitud para conseguir aquello para lo que ha sido diseñado. Por tanto, la eficacia de un sistema productivo dependerá de la capacidad y la disponibilidad de este (Figura 1).

La capacidad de un sistema productivo hace referencia a las características internas del sistema que le permiten responder a la demanda de servicio para la cual ha sido diseñado.



Figura 1. Definición de eficacia

Sin embargo, la disponibilidad de un sistema de producción es la aptitud del sistema para estar en situación de realizar una función requerida en condiciones dadas en un instante de tiempo e intervalo determinado (Figura 2).



Figura 2. Definición de disponibilidad

La fiabilidad se define como la aptitud de un elemento para realizar la función requerida en unas condiciones de determinadas de operación y mantenimiento durante cierto intervalo de tiempo. Por consiguiente, si un sistema productivo no tiene un mantenimiento adecuado las previsiones de fiabilidad no de los equipos que los conforman no se cumplen.

La mantenibilidad de un equipo se define como la aptitud en condiciones dadas de uso, para ser mantenido o restituido a un estado en el que pueda realizar una función requerida. Siempre y cuando, su mantenimiento se lleve a cabo en las condiciones establecidas, y utilizando los procedimientos y medios definidos.

Mientras que la mantenibilidad y la fiabilidad de un sistema de producción son inherentes al mismo, la logística está relacionada con aspectos organizativos. Esta hace referencia a la capacidad que tiene una organización para proporcionar sobre la demanda los medios necesarios para mantener los equipos conforme a la política de mantenimiento establecida.

#### 4.1.3.2. Fallos

El fallo de un sistema es definido como un suceso que provoca la pérdida de la capacidad de un sistema para realizar las funciones requeridas o la pérdida de la capacidad para satisfacer los requisitos especificados.

La gran mayoría de los sistemas de producción son recuperables, es decir, que después de un fallo este puede recuperar la capacidad para realizar una función concreta. Al conjunto de tareas necesario para que un sistema recupere su capacidad para realizar una función se le denomina mantenimiento.

El intervalo de tiempo en que el sistema puede estar desarrollando su función depende de la interacción entre las características de un sistema que le son inherentes como por ejemplo el diseño, la fiabilidad o la mantenibilidad, y las actividades de gestión y ejecución de las funciones logísticas y de mantenimiento asociadas a dicho sistema.

#### 4.1.3.3. Operaciones y mantenimiento

La función de producción de un sistema se define como función operativa y a la dirección de la producción se le denomina dirección de operaciones. La dirección de operaciones está orientada a la utilización económica de los medios por los operarios con la finalidad de la transformación de unos materiales en producto o la realización de unos servicios.

La gestión de la producción se lleva a cabo mediante la interacción de los siguientes subsistemas. El subsistema de planificación el cual se encarga de la previsión de la demanda y del establecimiento de los planes de producción a medio y largo plazo. El subsistema de programación es el encargado de transformar el plan de producción diario en un programa de producción. El subsistema de seguimiento y control que supervisa y asegura que se cumplan las previsiones establecidas, y por último el subsistema de costes encargado de determinar el coste de cada uno de los productos y servicios.

La gestión del mantenimiento es similar a la dirección de operaciones, está orientada a la utilización económica de los medios por parte de los operarios con la finalidad de conservar o restituir los equipos de producción a unas condiciones que les permitan cumplir con una función requerida.

#### 4.1.4. TIPOS DE MANTENIMIENTO

Los equipos siguen políticas de mantenimiento en el día a día, las cuales se basan en el desarrollo de tareas de conservación, revisión y reparación. Estas se pueden clasificar en:

- **Mantenimiento correctivo:** conjunto de actividades destinadas a corregir defectos y solucionar fallos, en este caso se espera a que ocurra el problema para brindar la solución adecuada.
- **Mantenimiento preventivo:** Conjunto de actividades que buscan anticiparse a la ocurrencia de un problema o avería, estas actividades son planificadas en el tiempo y espacio, buscando fortalecer puntos frecuentes de fallo, localizando vulnerabilidades y reemplazando componentes antiguos o desgastados.
- **Mantenimiento predictivo:** encargado de recopilar y analizar información que permita determinar el momento y lugar adecuado para efectuar tareas de mantenimiento preventivo. Esto requiere que los equipos consten con instrumentos adicionales que permitan adquirir dicha información.
- **Mantenimiento en uso:** consiste en la realización de tareas cotidianas realizadas por el mismo operador de los equipos, básicamente se trata de trabajos de limpieza, inspección visual, toma de datos y lubricación.

## 4.2. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

### 4.2.1. INTRODUCCIÓN

La gestión del mantenimiento se implementa de forma idéntica a la dirección de operaciones, puesto que esta forma parte de la dirección de operaciones. No obstante, la gestión del mantenimiento usa técnicas y métodos específicos para la resolución de problemas muy concretos. Estos métodos y técnicas recogen y tratan de forma adecuada la complejidad del problema. Además ofrecen a los gestores del mantenimiento soluciones para priorizar y enfrentarse a los problemas.

En la figura 3 se observa el ciclo normal de la gestión del mantenimiento. En ella se recogen las distintas etapas que se deben efectuar para gestionar el mantenimiento de forma óptima y eficiente.



Figura 3. Fases de la gestión del mantenimiento

En la figura 4 se muestra cada una de las herramientas empleadas para resolver cada una de las etapas correspondientes.

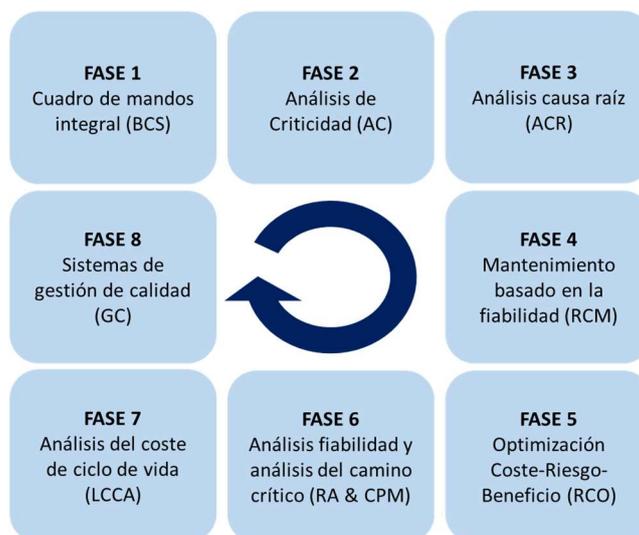


Figura 4. Herramientas para la gestión del mantenimiento

#### 4.2.2. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

La definición de objetivos es la primera fase del proceso de gestión de mantenimiento. Durante esta etapa se establecen los objetivos, las estrategias y las responsabilidades que se han de llevar a cabo. Se define esta fase como una etapa de consultoría en la que se realizan una serie de actividades para estudiar lo que se pide y lo que se pretende hacer. A partir de este análisis, se fijan los objetivos a alcanzar y cómo alcanzarlos.

La herramienta utilizada para establecer objetivos es el cuadro de mandos integral (Figura 5). Se trata de una matriz cuyas columnas son: objetivos estratégicos; las medidas o KPI que son los índices indican cómo de cerca se está de alcanzar el objetivo; las metas, que hacen referencia a los objetivos cualitativos, es decir, las cifras que se desean obtener; los planes de acción donde se describen las actividades a realizar; y por último, la perspectiva o el ámbito para el que queremos conseguir la mejora.

	OBJETIVOS ESTRATÉGICOS	MEDIDAS (KPI)	METAS	PLANES DE ACCIÓN	PERSPECTIVA
MISIÓN & ESTRATEGIA					FINANCIERA
					CLIENTES
					PROCESOS INTERNOS
					APRENDIZAJE

Figura 5. Cuadro de mandos integral

La figura 5 presenta el cuadro de mando integral (BCS). Esta matriz debe usarse como plantilla al inicio de la primera fase y se irá completando a medida que se marquen los objetivos. Una vez completada toda la tabla, esta será la guía básica en el resto de operaciones a realizar en todo el ciclo.

#### 4.2.3. JERARQUIZACIÓN DE EQUIPOS

La segunda etapa del proceso es la jerarquización de los equipos que forma el sistema productivo. Durante esta fase se clasifican los distintos sistemas y equipos para poder dar una prioridad de importancia en el trabajo.

Para ello, el método que se utiliza es el Análisis de Criticidad (Figura 6). Se trata de una metodología que consiste en jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Los pasos a seguir en el análisis de criticidad son los siguientes:

1. Definir un alcance y un propósito para el análisis.
2. Establecer criterios de importancia.
3. Seleccionar un método de evaluación que permita jerarquizar los sistemas.

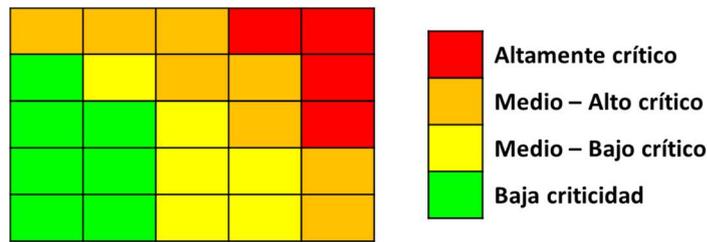


Figura 6. Matriz de criticidad

#### 4.2.4. ANÁLISIS DE PUNTOS DÉBILES

La tercera fase es el análisis de puntos débiles de los sistemas y equipos que conforman el sistema productivo. Este tipo de análisis se realiza mediante la metodología Análisis Causa Raíz (ACR). Este estudio permite identificar las causas raíces que originan los fallos dentro de los procesos de producción.

Durante el desarrollo de esta metodología se realiza un análisis de los fallos repetitivos o procesos críticos; se analizan los errores humanos tanto en la fase de diseño como de procedimientos y supervisión. Por último, se estudian las deficiencias organizacionales.

#### 4.2.5. PLANES DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y RECURSOS ASOCIADOS

La cuarta fase de la gestión del mantenimiento es la creación de planes de mantenimiento preventivo y la asignación de los recursos necesarios para llevar a cabo dichos planes. A fin de realizar una adecuada ejecución de las tareas de mantenimiento, se considera imprescindible realizar previamente una planificación eficiente. Las principales ventajas del mantenimiento planificado son las siguientes:

- Mejora de la gestión de la disponibilidad de los equipos
- Facilita la gestión de repuestos
- Aumenta el tiempo entre fallos
- Facilita las tareas de mantenimiento
- Previene el deterioro del equipo
- Mejora la prevención de la avería

La principal herramienta empleada es el mantenimiento centrado en la fiabilidad de los equipos. Esta metodología trata de determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe llevando a cabo su función. Esta metodología se divide en dos etapas:

1. **Fase inicial.** Jerarquización de los activos y conformación de los equipos de trabajo.
2. **Fase de implantación.** Definición de las funciones, determinación de los fallos funcionales, e identificación de los modos de fallo, sus efectos y las consecuencias.

#### 4.2.6. PROGRAMACIÓN MANTENIMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS

La quinta fase del proceso de gestión del mantenimiento es la programación de los planes de mantenimiento preventivo. El principal objetivo de esta etapa es modelar el problema y tratar de encontrar el trabajo óptimo de los planes de mantenimiento en relación con la asignación de los recursos.

Con el fin de poder ejecutar todas las tareas planificadas dentro del plazo definido, es necesario realizar una programación de los recursos necesarios de modo que se pueda optimizar el trabajo al máximo. Las reglas para una óptima y eficiente programación se definen a continuación:

- Clasificación de la órdenes de trabajo pendientes por especialidad
- Ordenación de la órdenes de trabajo por prioridad
- Enumerar en una lista tanto las órdenes de trabajo finalizadas como las pendientes
- Combinar órdenes de trabajo de acuerdo con su prioridad, localización, duración y permisos
- Programar las tareas de múltiples especialidades al inicio de cada turno de trabajo
- Generar un programa diario
- Supervisión final por el técnico

Es de elevada importancia, que se realiza un análisis de coste y duración de la ejecución una vez ejecutadas las órdenes de mantenimiento con el objetivo de mejorar los planes de mantenimiento en el futuro.

Además, es muy importante definir en la programación del mantenimiento los repuestos necesarios para llevar el plan acabo. De forma que las cantidades necesarias estén disponible a la hora de realizar los trabajos.

#### 4.2.7. EVALUACIÓN Y CONTROL

La sexta fase es la evaluación y el control de la ejecución del mantenimiento. Esta etapa se encarga de estudiar los tiempos de fallo, las tasas de fallo, la disponibilidad e indisponibilidad de los equipos de modo que se establezca una ruta óptima de operación.

Esta tarea consiste en realizar un análisis de la fiabilidad y análisis del camino crítico. La herramienta del camino crítico ayuda a conocer el tiempo que podría estar parada una instalación debido al fallo de un equipo o activo en concreto.

#### 4.2.8. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LOS EQUIPOS

La séptima fase del proceso de gestión del mantenimiento es el análisis del ciclo de vida de los equipos y su renovación. Los equipos no son eternos, llega un punto de su vida útil en el que es necesario plantearse si se deben o no renovar los equipos, bien por inoperatividad o por vejez, para desempeñar las funciones para las que había sido instalado. Esta decisión se toma en base al coste del ciclo de vida del producto.

Para analizar el coste del ciclo de vida de un equipo o activo se tienen que tener en cuenta diversos puntos, estos son: minimizar la inversión inicial, disminuir los costes de operación y mantenimiento e incrementar la vida útil. Además de buscar un nuevo equipo que cumpla con las funciones de producción, hay que conseguir que este sea más fiable, de mayor eficiencia, mayor seguridad y calidad.

Para calcular el coste del ciclo de vida de un activo (CTA) se utiliza la ecuación matemática (1). En ella se aglutinan todos los costes que conllevan tanto la adquisición como la explotación del equipo. Estos costes son el coste de adquisición inicial (CI), los costes operacionales (CO), los costes de mantenimiento preventivo (CMP), los costes totales por fiabilidad (CTPF) y los costes de mantenimiento correctivo estimados (CMM).

$$\text{CTA} = \text{CI} + \text{CO} + \text{CMP} + \text{CTPF} + \text{CMM} \quad (1)$$

#### 4.2.9. IMPLANTACIÓN DEL PROCESO DE MEJORA CONTINUA

La última fase del proceso de gestión del mantenimiento es la implantación del proceso de mejora continua. En esta etapa del proceso se analizan los fallos cometidos a nivel humano y qué aspectos se pueden mejorar en el futuro. Todas estas mejoras pasan por fortalecer los aspectos humanos, la fiabilidad humana, la motivación y el entrenamiento.

## 5. ANÁLISIS DE PROBLEMAS

### 5.1. DEFINICIÓN DE PROBLEMAS

Un problema se define como: *“El paso inicial de cualquier actividad para solucionar problemas o mejorar continuamente. Si un problema puede definirse claramente y con suficientes detalles, las causas y las soluciones empiezan a ser evidentes”*. Otra definición del término problema es: *“Una situación que ocurre a la cual hay que darle solución”*.

Es un error resolver los problemas mediante procesos de causa y efecto con soluciones que solo aplican a problemas basados en reglas. Esta es una de las principales causas por las que muchas de las soluciones implementadas son inefectivas y muchos de los problemas vuelven a surgir después de cierto intervalo de tiempo determinado. Algunos de los fallos que se cometen a la hora de solucionar problemas son los siguientes.

- **Ignorar la definición del problema.** En muchas ocasiones se busca obtener una solución sin haber realizado antes un análisis detallado del problema, esto implica dar por hecho lo obvio y restar importancia al asunto
- **Realización de informes incorrecta.** Se utilizan lista de cheque erróneas, se dejan espacios en blanco y no se categorizan de forma correcta
- **Narrativa tipo fábula.** La secuencia de los eventos sucedidos se focaliza en las acciones y se toman los relatos como hechos
- **Punto de vista común.** Existe una creencia de que todas las personas ven las cosas como nosotros y no se muestra la capacidad de razonar a la hora de trabajar en equipo, por tanto no se puede mejorar
- **Carencia del sentido común.** Carecer de sentido común y tomar éste como una ilusión, de modo que se cree que la percepción es una realidad
- **Visión sistemática del error**

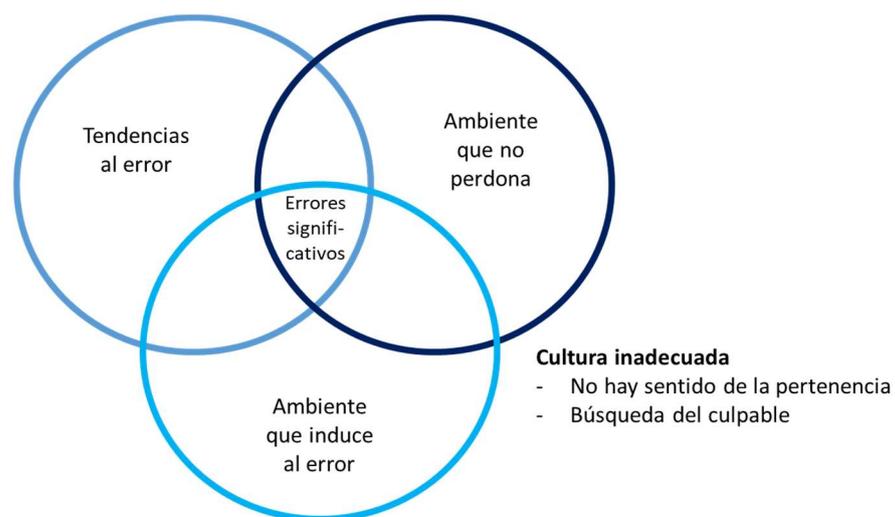


Figura 7. Factores de los problemas

Para evitar caer en este tipo de fallos que provocan que los problemas no consigan resolverse con la exactitud y eficiencia que deberían, es decir, conseguir alcanzar la solución total al problema para evitar que este vuelva a ocurrir se deben utilizar las técnicas adecuadas para identificar las causas raíces que han provocado el problema.

Existen diversas técnicas que permiten profundizar totalmente en el problema y conseguir una mejor definición de lo que ha ocurrido. Estas técnicas proporcionan la información necesaria para llegar al fondo del problema y obtener así la solución más óptima posible. En otras palabras, utilizando estas se invierte el tiempo justo y necesario para resolver el problemas esto permite ahorrar tiempo en el futuro ya que se conoce la causa raíz del problema.

## 5.2. METODOLOGÍAS PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

En muchas ocasiones, los problemas se resuelven sin encontrar las causas que los han producido, por lo que en un futuro estos problemas vuelven a ocurrir y se deberá invertir tiempo innecesario para solucionarlo.

Con el paso de los años y el resurgimiento de las nuevas tecnologías, los procesos productivos han pasado de ser procesos manuales a ser parcialmente automatizados y hasta en algunas ocasiones totalmente automatizados. Por consiguiente, los equipos son cada vez más complejos y más complicados, y localizar el origen de un fallo se ha convertido en un proceso muy complejo.

Sin embargo, actualmente existen distintas herramienta que ayudan a resolver algunos de los grandes problemas de la industrial actual. Estas herramientas contribuyen a hallar las causas reales por las cuales ocurre un fallo y atacarlas desde la raíz, y no atacar de forma superficial sus síntomas.

Hay diversas técnicas distintas para resolver problemas o incidentes que puedas surgir. Todas ellas persiguen el mismo objetivo, alcanzar la causa raíz de los problemas. En la siguiente figura se clasifican las técnicas más importantes para la identificación de las causas raíces que han producido un problema.

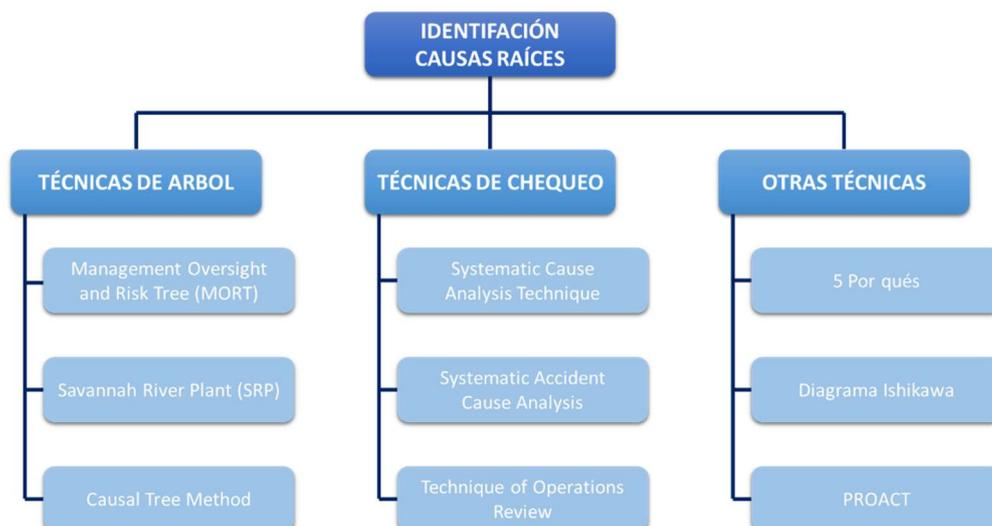


Figura 8. Metodologías para la identificación de causas raíces

## 5.3. TÉCNICAS DE ARBOL

### 5.3.1. MANAGEMENT OVERSIGHT AND RISK TREE (MORT)

MORT (Management Oversight and Risk Tree) es un procedimiento analítico que proporciona un método disciplinado para determinar las causas y los factores que contribuyen en los problemas más importantes. Esta técnica también es utilizada para evaluar la calidad del programa de seguridad.

La técnica MORT utiliza símbolos y una lógica similares a la utilizada en FTA (Análisis del Árbol de Fallas). Sin embargo, a diferencia de la FTA, la técnica MORT representa un árbol de fallos que ya ha sido construido, por lo que los analistas no lo tienen que construir. Este árbol es examinado por los analistas y descartan de él todas aquellas ramas que no son relevantes para el incidente en cuestión. Además, esta técnica no solo analiza lo que ocurrió durante el incidente, sino que rastrea los factores causales para ayudar a los sistemas de gestión a identificar por qué sucedieron dichos incidentes.

Esta herramienta consta de ocho árboles de interconexión a través de los cuales pueden ser identificados 98 problemas genéricos y 200 causas básicas. El número de causas básicas puede ser incrementado hasta 1500 en algunas ocasiones. Dentro de los árboles los problemas genéricos son representados por cajas rectangulares, mientras que las causas básicas se representan mediante círculos. ¿Figura?

El gráfico MORT comienza con un evento superior, el cual representa la pérdida producida por el problema. Una vez establecida la extensión del incidente, el usuario llega a la primera puerta lógica. El modelo establece que la pérdida habrá surgido a partir de un “Supuesto de Riesgo”. Sólo aquellos riesgos que son identificados, analizados y aceptados a nivel de gestión adecuada pueden ser riesgos asumidos. Sin embargo, los riesgos desconocidos o no analizados son de supervisión y omisiones de defecto.

El objetivo de este método es identificar las causas fundamentales que han producido el problema a partir del gráfico. El analista logra este objetivo realizando una serie de preguntas en cada momento. El primer requisito es establecer si los elementos son aplicables al incidente y si no lo son, deben ser tachados. Una vez descartados los elementos no aplicables, se trata de buscar el elemento promotor del problema. Los elementos menos adecuados son marcados en rojo, los adecuados en verde y de los que se necesita más información en azul. El análisis finaliza cuando todos los elementos marcados en azul se han abordado y posteriormente juzgado como adecuados o menos.

### 5.3.2. SAVANNAH RIVER PLANT

El sistema de Savannah River Plant sigue una estructura similar al sistema MORT, empezando por una descripción del incidente, utilizando eventos y factores causales de gráfico, y usando un árbol predefinido y genérico para identificar las causas raíz. En cambio, no hay ninguna lógica incorporada en la estructura del árbol SRP.

Las divisiones iniciales en el árbol se refieren a “dificultad operador”, “dificultad de equipos” y “dificultades de técnicas”; con los aspectos del bienestar de la gestión incorporados en la parte inferior de la estructura.

Las causas raíz del árbol se dividen en varias secciones, que se representan como nodos. Además, el árbol se divide en seis niveles, desde A hasta F, con cada nivel en vías de ser más detallado para llegar hasta las causas fundamentales en el nivel F.

El árbol que utiliza el sistema SRP incorpora 7 causas de rendimiento humano: procedimientos, formación, control de calidad, comunicaciones, sistemas de gestión, ingeniería humana y supervisión inmediata; y 5 causas de fiabilidad de los equipos: mantenimiento preventivo inferior al adecuado, falta de repetición, fallo inesperado, diseño y equipo/piezas defectuosas.

En la aplicación de este método, el analista debe decidir cuál de los factores causales ha determinado que ocurra el incidente. Para cada factor causal, se determina qué nodo de nivel superior es aplicable, se mueve hacia el siguiente nodo y se selecciona otra opción aplicable desde este nivel. Solo son considerados los nodos de nivel inferior que se ramifican desde el nodo elegido en el nivel anterior.

### 5.3.3. CAUSAL TREE METHOD

El principio del método Causal Tree Method (CTM) es que un accidente tiene lugar por cambios o variaciones en un proceso normal. La función del analista en este método es identificar los cambios en el sistema, elaborar una lista de los cambios, organizarlos en un diagrama y definir su interrelación. A diferencia de un árbol de fallos, en este método sólo se incluyen las ramas que conducen al incidente, y el diagrama se representa a partir de simples reglas que especifican las cadenas de eventos.

Esta metodología describe 7 pasos en el proceso de investigación de problemas desde la recopilación de datos hasta el seguimiento de las acciones. Además, para una correcta aplicación del método, éste tiene que ser llevado a cabo por un equipo de trabajo completo.

El método CTM establece un resumen por escrito en lugar de una forma de diagrama. A partir de la información recopilada por el equipo de trabajo sobre el problema, se deben extraer todos los hechos relacionados con éste. Cada “hecho” es un acontecimiento singular u ocurrencia. El evento final sirve como punto de partida y es el grupo el que selecciona qué hechos han contribuido al problema.

La elección de los hechos y la forma en que está estructurado el árbol debe ser acordado por unanimidad. Con el fin de evitar que se elija una sola causa de las investigaciones de problemas, se le pide al grupo de trabajo que identifique un mínimo de tres factores para cada incidente, uno de cada dentro de las siguientes tres categorías: factores organizativos, humanos y materiales.

## 5.4. TÉCNICAS DE CHEQUEO

### 5.4.1. SYSTEMATIC CAUSE ANALYSIS TECHNIQUE

El análisis Técnico de Causa Sistemática (SCAT) es un método utilizado para determinar las causas principales de un problema una vez que se ha realizado la descripción de la secuencia de eventos que han desencadenado el problema.

Este modelo considera que los cinco factores fundamentales que contribuyen al problema son los siguientes: falta de control, causas básicas, causas inmediatas, incidentes y pérdida. Si uno de estos factores falla desencadena problemas en los restantes, por tanto el objetivo de este modelo eliminar el factor que ha producido el fallo para evitar que el impulso pueda alcanzar el siguiente.

Esta técnica se presenta como un gráfico que contiene cinco bloques distintos correspondientes cada uno de ellos a cada uno de los factores fundamentales descritos anteriormente. En el primer bloque de este gráfico se describe el problema. En el segundo bloque se enumeran las categorías más comunes de contactos que han dado lugar al problema. El tercer bloque enumera la causa inmediata o directa más común de ese contacto. En el cuarto se identifica la causa básica, y por último en el quinto bloque se gestionan las listas de seguridad que deben ser abordadas para prevenir futuros problemas.

### 5.4.2. SYSTEMATIC ACCIDENT CAUSE ANALYSIS

SACA fue desarrollado por Waldram (1988) para el análisis de las estadísticas de accidentes en instalaciones de alta mar. Este método afirma que todos los accidentes tienen múltiples causas, aunque diversas seas de igual importancia no son igualmente extraíbles. El enfoque SACA tiene como objetivo analizar las causas y las estadísticas para determinar las áreas en las que hay que intervenir.

Esta herramienta identifica dos tipos de fallos que no son razonablemente posibles de evitar para la organización. El primer tipo de fallo hace referencia a los fallos producidos por parte de aquellos que no son responsables de la gestión de la línea, y el segundo tipo de fallo está relacionado con los empleados y empresarios de la propia organización.

SACA identifica cuatro categorías principales de causas que se pueden dar en cualquier situación de trabajo, estas son: Persona directamente involucradas, equipo y lugar de trabajo, sistemas de trabajo y control en el exterior. Además estos 4 tipos de causa se pueden subdividir en diferentes, sumando un total de 14 tipos de causas diferentes.

El objetivo de este análisis es identificar cuáles son las principales causas que contribuyen a los accidentes. Para ello, una vez recogidos y analizados todos los datos estos son representados por porcentajes. La subcategoría con el porcentaje más alto será la que requiera mayor atención, y las demás se pueden valorar para desarrollar una lista de acciones que permita evitar accidentes en el futuro.

### 5.4.3. TECHNIQUE OF OPERATIONS REVIEW

La técnica TOR fue desarrollada en 1973 por Weaver como una herramienta de formación para asistir en la prevención de incidentes. Posteriormente, esta técnica se ha aplicado como técnica de investigación para la identificación de las causas del sistema, buscando identificar los fallos de gestión en lugar de culpar a los operadores involucrados.

El análisis TOR se presenta en un formato de hoja de trabajo. Es una técnica de trabajo en equipo ya que requiere que todos los participantes contesten a una serie de preguntas. Una condición de este análisis es que el grupo alcance un consenso sobre las respuestas de las preguntas.

Una vez producido un incidente e identificados los hechos relacionados con éste, estos hechos pueden ser analizados mediante el análisis TOR. Los miembros del grupo deben ser un seleccionador y un líder elegido desde dentro del grupo para dirigir el análisis y mantenerlo. Este proceso se divide en cuatro pasos básicos. En primer lugar, se establecen los hechos que han desencadenado el incidente, y son entendidos y acordados por todos los miembros del grupo. En segundo lugar, el grupo debe decidir sobre cuál fue el principal error que causó el incidente para posteriormente analizar todos los posibles factores que han contribuido para que se produzca. En tercer lugar, una vez finalizada la búsqueda, se eliminan todas aquellas causas que se consideran insignificantes, y por último, el grupo debe identificar las acciones correctivas realistas que se pueden tomar para que no vuelva a suceder el incidente.

## 5.5. OTRAS TÉCNICAS

### 5.5.1. CINCO POR QUÉS

La técnica de los cinco porqués se trata de una técnica sistemática de preguntas utilizada durante la fase de análisis de problemas para encontrar las principales causas. Durante esta fase, los miembros del equipo pueden sentir que tienen suficientes respuestas a sus preguntas. Por eso la técnica exige que el equipo pregunte al menos cinco veces la misma cuestión hasta que ésta sea difícil de responder, y por tanto la causa más probable habrá sido identificada.

Este método suele comenzar llevando a cabo una reunión de tormenta de ideas, y, una vez detectadas las causas más probables del fallo, se debe empezar a preguntar “¿Por qué es así?” o “¿Por qué está pasando?”, repitiendo estas preguntas cinco veces como mínimo de modo que obligue al equipo a no conformarse con causas ya probadas y ciertas. Cabe destacar que en este método no se debe preguntar por quién puesto que lo importante es el proceso y no las personas involucradas.

Si no se recurre a realizar la técnica de los cinco por qué, se deben identificar al menos los problemas teniendo en cuenta los factores básicos del error y no buscando al responsable, ya que aún encontrando al responsable, los problemas persistirán independientemente de la persona que esté realizando la tarea.

En la figura 9 se muestra un esquema de la aplicación de este método para la resolución de un problema.



Figura 9. Técnica 5 por que's

### 5.5.2. DIAGRAMA ISHIKAWA

El diagrama de Ishikawa es conocido como espina de pez debido a su estructura. Éste consiste en una representación gráfica sencilla en la que se puede ver de forma relacional una especie de espina central en la que se representa el problema a analizar y se escribe a la derecha. Esta técnica surgió a lo largo del siglo XX en ámbitos de la industria y posteriormente en el de los servicios para facilitar el análisis de problemas y sus soluciones.

Este diagrama causal es la representación gráfica de las relaciones múltiples de causa-efecto que existen entre las diversas variables que intervienen en un proceso productivo. Normalmente se dividen las causas en diferentes categorías, las cuales son las siguientes; medidas, material, mano de obra, entorno, método, máquina y mantenimiento.

La metodología empieza en la creación de un equipo de trabajo capaz de identificar las categorías para el problema en cuestión y realizar un *brainstorming* para identificar las causas. A continuación, todas las posibles causas son anotadas dependiendo de su categoría y se eliminan las posibles duplicidades. Una vez agrupadas por categorías se verifican y se eliminan todas aquellas que no sean causas principales, ya que estas serán analizadas por el equipo.

Para la creación del diagrama de espinas (Figura 10), hay que tener en cuenta que todas las espinas deben ser causas posibles, todas las causas deben ser presentadas en las vías que indiquen cómo se relacionan con el problema y la disposición de las espinas debe reflejar las relaciones entre las causas.

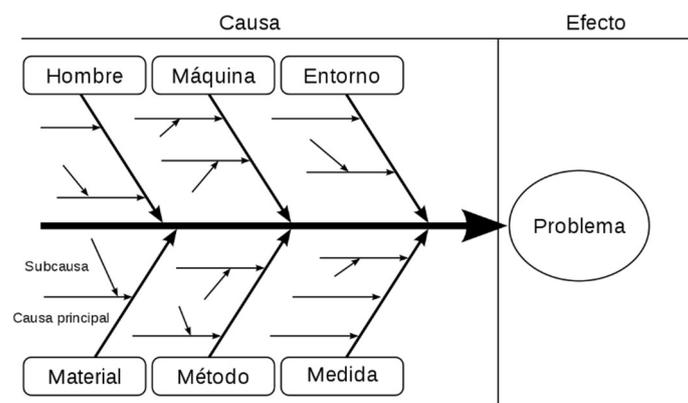


Figura 10. Diagrama Ishikawa

### 5.5.3. METODOLOGÍA PROACT

La metodología PROACT fue desarrollada por el Reliability Center Inc. Esta metodología consta de diversos pasos sistemáticos que ayudan a localizar las causas, orígenes o raíces de los fallos que se estén estudiando y avanzar así hacia la mejora continua de los procesos productivos y de la confiabilidad de los equipos. Los cinco pasos en los que se divide esta herramienta son los siguientes:

6. **Recolectar datos.** Esta fase consiste en reunir todos los datos relacionados con el fallo. Para una correcta ejecución, el equipo de trabajo debe ser lo más objetivo posible y evitar suposiciones puesto que solo se conseguirá llegar a un resultado real si se utilizan datos reales. Todos los datos deben ser recogidos, clasificados y analizados sin obviar detalles.
7. **Ordenar el análisis.** Se debe asegurar que el equipo destinado a realizar el análisis sea multidisciplinario, conformado por representantes de cada departamento involucrado con el fin de descartar las hipótesis y realizar un análisis con distintos puntos de vista.
8. **Analizar los datos.** En esta etapa del proceso, el equipo aplica el árbol de fallos que propone el Reliability Center Inc, el cuál es un proceso de deducciones lógicas y disciplinadas que obliga al equipo a trabajar desde el fallo hasta las causas.
9. **Comunicaciones y recomendaciones.** Una vez finalizado el análisis causa raíz, las soluciones de los fallos parecen aparentes. Aun así, se deben presentar todos los hallazgos encontrados y las recomendaciones para motivar a tomar acciones correctivas que solucionen los problemas.
10. **Asegurar el éxito.** En esta etapa de la metodología se propone realizar los cambios e inversiones pertinentes para evitar que el fallo ocurra por la misma causa, eliminando así ésta y realizando un seguimiento para detectar los beneficios obtenidos.

La importancia que ha alcanzado esta técnica de resolución de problemas y la eficacia que consigue en la búsqueda de la causa raíz de problemas, así como la estructura elaborada y organizada que sigue el proceso la cual permite obtener con detalle toda la información relacionada con el problema, han motivado que sea la metodología escogida para llevar a cabo el presente estudio.

Por naturaleza, el estudio objeto de este proyecto, es un incidente que puede conllevar numerosos problemas y que además pueden estar originados por un abanico de opciones muy grande. Debido a su complejidad a la hora de determinar el problema, es conveniente seguir una estructura de estudios clara y concisa, como la que se ha descrito en este apartado, que permita definir de forma ordenada todos los pasos necesarios para alcanzar a determinar la causa raíz que originó el problema.

## 6. MÉTODO “ANÁLISIS CAUSA RAÍZ”

### 6.1. INTRODUCCIÓN

#### 6.1.1. DEFINICIÓN DE ACR

El Análisis Causa Raíz (ACR) es un método de análisis deductivo que identifica las causas que conducen al fallo a un sistema, equipo o instalación. Conociendo estas causas se puede prevenir o evitar la recurrencia o reaparición de los fallos en el mismo equipo o instalación o en similares. Aplicando métodos que no realizan un análisis exhaustivo del fallo y de sus posibles causas se pierden oportunidades de mejora en la relación coste-producción-confiabilidad.

En la mayoría de las organizaciones el equipo de mantenimiento están muy ocupado y no tiene tiempo para identificar las causas raíces de los problemas, sino que se aplican acciones para seguir funcionando. Se conoce que posponer la acción correctiva de la causa raíz de un problema es común a muchas organizaciones. Este hecho hace que sea necesario crear programas para el Análisis Causa Raíz de forma que se ayude a recordar que, si un programa de mantenimiento preventivo no se ejecuta cuando se debe, los equipos sufren una mayor cantidad de fallos.

En términos generales, la metodología Análisis Causa Raíz está basada en la identificación de las causas raíces primarias de los problemas, para posteriormente generar acciones correctivas que eliminen estos problemas de forma definitiva.

Todos los problemas pueden tener una o varias causas raíces físicas. Estas causas físicas pueden tener su origen en la intervención humana y ésta a su vez puede ocurrir por alguna desviación en los sistemas gerenciales u organizacionales. Estas últimas se conocen como las Causas Raíces Latentes de un fallo y serán las que se reconocerán como las verdaderas raíces.

#### 6.1.2. CONCEPTOS CLAVE

En este apartado se definen conceptos que se utilizan en el desarrollo y aplicación del Análisis Causa Raíz para la resolución de un problema. Estos conceptos son:

- **Fallo.** Terminación de la capacidad de un ítem para realizar una función requerida y cuya restitución requiere una intervención.
- **Eventos de alto impacto.** Eventos especiales y puntuales que resultan en una pérdida de producción importante o altos costes de mantenimiento.
- **Problemas recurrentes o crónicos.** Problemas que se repiten en el tiempo, es decir, un problema se considera recurrente cuando se repite de una manera inusual para el tipo de equipo o proceso.
- **Lista jerarquizada de problemas.** Lista donde los problemas recurrentes son jerarquizados según su impacto económico en términos de la exposición al riesgo.
- **Exposición al riesgo.** Representa el riesgo en términos de €/año, y es equivalente al impacto económico que se espera que tenga un problema en el futuro acorde a su frecuencia y probabilidad de fallo actuales.

- **Causa raíz física.** Es la causa que origina directamente el fallo y su solución resuelve el problema.
- **Causa raíz humana.** Identifica las acciones humanas que disparan la causa raíz física.
- **Causa raíz latente.** Representa la manifestación de los procesos organizacionales que explican la ocurrencia de las causas raíces humanas. Solo la erradicación de este tipo de causas garantiza que el fallo no se repita en el equipo estudiado o en uno similar.
- **Modo de fallo.** Identifica la manera de cómo un sistema/equipo falló.
- **Método del árbol lógico.** Es una herramienta utilizada en el proceso del ACR para ordenar gráficamente el análisis de manera secuencial, desde el evento y a través de los diferentes modos de fallo, relacionando las causas y efectos, hasta llegar a las causas raíces de dicho evento. Las verdaderas causas son descubiertas permitiendo que las evidencias físicas conduzcan al equipo hasta encontrar los factores que intervinieron para que éstas se produjeran.
- **Hipótesis.** Lista de posibles mecanismos de fallo de cada modo de fallo. Al ser verificada una hipótesis, ésta se convierte en una causa.
- **Acción.** Asignación para ejecutar una tarea o series de tareas con el fin de resolver una causa identificada en la investigación de un fallo o problema.
- **ACBR.** Análisis Coste Beneficios Riesgo, se define como la estimación del beneficio económico de la realización de un cambio, modificación o reparación mayor. El análisis compara el impacto total de una situación futura, posterior al cambio, con la situación actual y el beneficio se compara con el coste del cambio.
- **Promotor del ACR.** Es la persona a nivel gerencial responsable de la implantación del proyecto.
- **Patrocinador del ACR.** Es el gerente de cada unidad operacional que promueve y motiva la iniciativa y los programas referentes al análisis causa raíz que se ejecutan en áreas bajo su responsabilidad.
- **Facilitador.** Es el experto en la metodología ACR, responsable de conducir los análisis. Es el encargado de planificar las sesiones de análisis y velar por la adecuada implantación de los programas de análisis.
- **Líder del equipo de ACR.** Los líderes son los encargados de guiar al equipo de trabajo a través del proceso y ayudar a desarrollar en el sitio de trabajo una mentalidad de búsqueda de las verdaderas causas raíces en los problemas
- **Perfil del equipo de ACR.** El equipo típico de ACR está comprendido por un líder de equipo, un facilitador, personal de operaciones e ingeniero, y personal de mantenimiento. Los miembros del equipo deben ser imparciales y necesitan estar enfocados en hallar las causas raíces latentes de la organización. Se recomienda un equipo de 5 a 8 personas. Es importante anexar a este equipo personal que esté directamente relacionado con los fallos que se estén analizando, entre estos, pueden citarse operadores y mantenedores.

## 6.2. VENTAJAS

La metodología Análisis Causa Raíz presenta numerosas diferencias respecto a otras metodologías utilizadas para la gestión del mantenimiento y la resolución de problemas. Esta metodología se caracteriza principalmente por llegar siempre al fondo de los problemas, es decir, encontrar el verdadero foco que ha producido el fallo. La aplicación de esta técnica para realizar el análisis de fallos de una forma sistemática y con criterios homologados ofrece las siguientes ventajas:

- Mejora la eficiencia de los procesos productivos debido a la prevención de fallos.
- Ayuda a identificar los problemas creando un panorama único basado en hechos.
- Incrementa la confiabilidad en los equipos e instalaciones.
- Reduce los costes de reparación puesto que los fallos crónicos son identificados y corregidos.
- Reduce la exposición al riesgo por seguridad y ambiente del personal ya que se disminuyen el número de fallos en los equipos.
- Permite un amplio acceso corporativo a la información producida por los análisis de los fallos ya que se mejora la comunicación de los resultados obtenidos y las acciones correctivas emprendidas.
- Conlleva el desarrollo de una memoria técnica de operaciones y mantenimiento en las instalaciones, los sistemas y los equipos.
- Ofrece una planificación proactiva de nuevas actividades de mantenimiento en base a los resultados obtenidos de los análisis en los sistemas e instalaciones similares.
- Posibilita la dedicación y el enfoque de esfuerzos a la optimización
- Prioriza el desarrollo de oportunidades frente a las actitudes reactivas
- Mejora la moral del personal laboral

## 6.3. PROCEDIMIENTO

### 6.3.1. INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre un fallo en un sistema productivo es percibido porque genera ciertas manifestaciones o síntomas, no así las causas del mismo que, mientras más complejo y extenso sea el sistema, mayor será la dificultad para localizar el origen de las causas que provocaron el fallo. Por ese motivo, en muchas ocasiones los fallos se convierten en recurrentes ya que se atacan sus síntomas y no las causas que los han producido.

La metodología Análisis Causa Raíz sigue un procedimiento esquemático basado en diversas fases que se deben ir completando en su totalidad para poder avanzar de un paso a otro (Figura 11). El principal objetivo de la aplicación de esta técnicas es llegar a la causa origen de un problema. Para ello es fundamental cumplir todos los pasos que componen el método de forma rigurosa y efectiva.

En primer lugar, es necesario definir de forma clara y concisa lo que ha ocurrido, en qué circunstancias, en qué zonas y qué espacio temporal. Durante esta fase el equipo de trabajo se cuestionará una serie de preguntas básicas y breves que ayuden a definir el problema. A

continuación, se conformará el equipo de trabajo que intervendrá durante la resolución del problema y su análisis.

En segundo lugar, se debe definir el sistema y el contexto operacional del problema a evaluar. Esta etapa es de gran interés, sobre todo en sistemas conformados por un gran número de equipos, ya que puede ser que existan fallos en equipos provocados por problemas anteriores en otros equipos.

En tercer lugar, el equipo de trabajo recopila todos los problemas que puedan estar relacionados con el fallo, de modo que se analizarán y se valorarán en gravedad y repercusión mediante métodos propios para ello. Fundamentalmente, se tiene que valorar la repercusión económica de los problemas.

En cuarto lugar se desarrolla plenamente el método. Durante esta fase del proceso, se describen los modos de fallo que han surgido, y a partir de ellos se realizan las hipótesis pertinentes a través de las cuales se empezarán a desglosar los diferentes tipos de causas: física, humana y latente.

En la última fase del método, se realiza un análisis exhaustivo de las soluciones. Esta es una de las etapas más importantes del método puesto que en ella se examina el rendimiento de éste. En esta etapa es en la que se debe implantar todas las soluciones propuestas y a partir de su puesta en marcha, comprobar los resultados que se obtienen tras el cambio y analizarlos para medir qué mejoras se han realizado en el sistema.



Figura 11. Procedimiento análisis causa raíz

### 6.3.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### 6.3.2.1. ¿Qué? ¿Cuándo? ¿Dónde?

El proceso de definición de problemas debe incluir las siguientes preguntas:

- ¿Qué? Se trata de dar respuesta a qué ocurrió y cuáles fueron los síntomas previos que se detectaron.
- ¿Cuándo? Es muy importante dejar constancia del momento en qué ocurrió el problema y cuándo aparecieron los síntomas.
- ¿Dónde? Es necesario definir el lugar exacto donde ha ocurrido el incidente, desde el país hasta la ubicación en planta del equipo que ha fallado.

Es de relevante importancia responder a estas preguntas al inicio del análisis del problema para poder definir de forma clara la idea básica de lo ocurrido. Sin embargo, otras preguntas, como quién fue el responsable, cómo ocurrió o por qué sucedió, son irrelevantes en la primera fase del proceso ya que el objetivo es solucionar el error y analizar las causas.

#### 6.3.2.2. Equipo de Trabajo

El equipo de trabajo es el grupo de personas que va a llevar a cabo el análisis para dar solución al problema y proponer mejoras para el futuro. Este grupo debe estar formado por integrantes de los diferentes departamentos de los que se compone la organización, los cuales deberán trabajar de forma conjunta durante el desarrollo del método. Para ello, es fundamental que exista sinergia entre todos los integrantes del equipo de forma que alcancen el objetivo común obteniendo resultados lo más óptimos posibles.

Algunas de las principales características que deben definir el equipo para que éste sea efectivo son las siguientes:

- Atmósfera informal y relajada
- Participación de todos los miembros del equipo de forma equitativa
- Aceptación y compromiso por parte de todos
- Escuchar a todos los miembros del equipo
- Los desacuerdos son discutidos para conseguir resolverlos
- Las decisiones se toman en consenso
- Críticas francas y frecuentes sin degenerar en ataques personales
- Ayuda externa bienvenida y usada cuando es apropiado
- Acciones claramente asignadas a cada uno de miembros
- Resultados validados y garantía de su implantación

En el funcionamiento normal del equipo de trabajo, debe existir una figura de líder que se encargue de tomar las decisiones pertinentes para la implantación de los resultados. El líder es el encargado de guiar al equipo a través de proceso y ayudarlo a desarrollar en el puesto de trabajo una mentalidad de búsqueda de las verdaderas causas raíces del problema.

Otro rol importante en este equipo, es el del facilitador. El facilitador debe asegurar la aplicación de la metodología, ayudar al equipo a obtener mejores resultados, guiar al equipo en

la realización del análisis y en la selección de las posibles soluciones. Este integrante del equipo es el responsable de que el método se aplique de una forma ordenada y efectiva.

Cada miembro del equipo debe aportar ideas y principalmente experiencias que ayuden al líder a alcanzar el objetivo que se haya marcado. Cada uno de ellos tendrá un rol completamente diferente pero complementario a los roles de los otros integrantes del equipo de trabajo.

### 6.3.3. DEFINICIÓN DEL SISTEMA

#### 6.3.3.1. Situación e historia de la instalación

En este apartado se menciona dónde está situada la instalación que se analiza en el proyecto y se incluye un breve resumen de su historia organizacional para poner en contexto a todos los integrantes del equipo.

#### 6.3.3.2. Diagrama de proceso

Para poder entender bien el sistema productivo en el cual ha tenido lugar el fallo se realiza un resumen aclaratorio del sistema completo en el que están involucrados el equipo o equipos donde se ha producido el fallo. Además, en este apartado se incluye el proceso de funcionamiento del sistema productivo.

#### 6.3.3.3. Contexto operacional

Se trata de definir el sistema o equipo que se pretende estudiar. En este apartado se debe incluir toda información sobre las características técnicas del equipo (esquemas, datos, planos, etc.), así como de su funcionamiento y las características del sistema que lo rodea. Toda la información será enriquecedora y añade valor en la documentación, ayudando a resolver de forma óptima el problema.

### 6.3.4. JERARQUIZACIÓN DE PROBLEMAS

Con el objeto de focalizar los esfuerzos en la solución de los problemas que generen mayor riesgo en las operaciones, es muy importante identificar correctamente los problemas de cada área, así como cuantificar su impacto utilizando elementos que incluyan el análisis cuantitativo del riesgo.

Los problemas recurrentes deberán recogerse en una lista jerarquizada por su impacto, compuesto por la suma de los costes de mantenimiento y pérdidas de oportunidad. La selección de los problemas a analizar debería seguir la secuencia de esta lista. Habitualmente, se fija un período de tiempo para la frecuencia de fallos de cada familia y se jerarquizan aquellos con mayor número de fallos para ese periodo determinado.

#### 6.3.4.1. Cuantificación del impacto

La cuantificación del impacto trata de evaluar cuál es el alcance del problema, es decir, determinar la importancia que tiene que haya surgido el problema. Para cuantificar el impacto de un problema se evalúan los siguientes seis factores:

- **Seguridad Industrial.** El factor evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en: 1) el daño al personal de la instalación, propio o ajeno, y/o a cualquier otra persona que pudiera verse involucrada en el entorno de la misma; 2) el daño en el valor de los activos industriales, de los productos y materiales usados en la producción, o en los productos finales, en instalaciones propias o ajenas.
- **Medioambiente.** Este factor evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en el medio ambiente, incluyendo los costes de protección y de recuperación del mismo, así como sanciones, indemnizaciones, etc.
- **Eficacia operativa.** Este factor evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento para el correcto funcionamiento de la organización, es decir, aquellos que afectan a la capacidad de la producción, costes operacionales y el desempeño energético.
- **Coste de mantenimiento.** Este factor evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en los costes de mantenimiento correctivo del mismo, incluyendo todos los costes asociados a la recuperación del equipo.
- **Grupos de interés público.** Este factor evalúa las consecuencias de la pérdida funcional de un elemento en las condiciones de prestación de los servicios de recepción y entrega del gas conforme a las NGTS, y el resto de servicios que ofrece Saggas a sus clientes, así como las posibles penalizaciones por el no cumplimiento de las especificaciones del suministro del servicio.
- **Frecuencia.** Contabilizar el número de fallos por un periodo de tiempo, generalmente por año.

#### 6.3.4.2. Análisis de criticidad

Uno de los pasos más importantes de esta metodología es poder determinar qué sistema o equipo es más importante que otro. Para establecer que equipo es más importante se utiliza un análisis cualitativo del riesgo. Este análisis se realiza mediante un modelo de factores ponderados basados en la teoría del riesgo, partiendo de la ecuación (2).

$$\text{RIESGO} = \text{FRECUENCIA} \times \text{CONSECUENCIA} \quad (2)$$

Los dos factores que conforman la ecuación se definen como:

- Frecuencia: número de fallos en un tiempo determinado
- Consecuencia = (Impacto operacional x Flexibilidad) + Costes de mantenimiento + Impacto

Para el cálculo del riesgo se asignan valores numéricos a cada apartado (frecuencia y consecuencia) de modo que los valores más altos suponen siempre la situación más crítica.

Para determinar la frecuencia es necesario conocer la tasa de fallos promedio para cada uno de los equipos. La figura 12 muestra la ponderación de la frecuencia en cada caso. Para determinar la consecuencia, se emplean las ponderaciones mostradas en la figura 13, donde se observa cada uno de los factores descritos en el subapartado 6.3.4.1 (Cuantificación del impacto).

Frecuencia de Fallos		
Fallos (por año)	Clasificación	Escala propuesta
4<f	MUY ALTO	2
2< f <4	ALTO	1,6
1< f <2	MEDIA	1,2
< 1	BAJA	1

Figura 12. Valoración de la frecuencia de fallo

SEGURIDAD INDUSTRIAL	MEDIO AMBIENTE	COSTES DE MANTENIMIENTO	EFICACIA OPERATIVA	GRUPO DE INTERÉS PÚBLICO
- Existe riesgo de accidente mortal de invalidez permanente - Existe ayuda para sofocarlo de medios externos con evacuación - Impacto a la toda terminal o al exterior con activación del plan de emergencia exterior.	-Derrame que afecta al exterior en zona muy vulnerable (fuera de la dársena, según riesgos ambientales APV).	- Por encima 30.000 €.	- Parada total de la planta, o cese de los servicios, mayor de 2 horas - No atender nominación - Costes operacionales mayores de 3GW (1día quemando antorcha).	- Sanción Administrativa - Ausencia de servicio (cese de servicio con notificación al cliente)
- Existe riesgo de daño irreversible - Es necesaria ayuda externa para sofocarlo, sin que exista evacuación - Existe impacto en la zona donde se encuentre el equipo o impacto exterior sin activar el plan de emergencia exterior.	- Exterior en zona no vulnerable (dentro de dársena) o zona interior, pero con notificación a la administración - Fugas de gas a la atmósfera (no emisiones fugitivas).	- De 15.000 € hasta 30.000 €.	- Afecta a la capacidad nominal en más de 6 horas - Hay pérdida total de redundancia en más de 48h - Costes operacionales de 1,5 - 3GW (0,5día quemando antorcha).	- No existen sanción, pero hay una pérdida de imagen Externa - Existe una reclamación con repercusión económica - Existe una pérdida de calidad en los parámetros de condiciones de entrega con afección al servicio.
- Existe riesgo de baja médica (daño reversible) - Se puede sofocar con medios internos pero con Activación del PAU - Impacto al equipo principal al que pertenece.	- Derrame en interior, en zona no habilitada.	- De 3.000 € hasta 15.000 €.	- Afecta a la capacidad nominal en menos de 6 horas (inmediato) - Pérdida total redundancia entre 6 h y 48 h, o pérdida parcial mayor a 6 horas. - Pérdida de eficiencia energética - Costes operacionales de 0 - 1,5GW.	- No existe sanción, pero hay una pérdida de imagen en ámbito local - Existe una reclamación escrita sin repercusión económica
- Existe riesgo de accidente sin baja - Se puede sofocar con medios internos pero sin activación del PAU - Afecta al propio item mantenible o equipo. - Sin afección	- Derrame en interior en zona habilitada para limpieza o derrames que se puedan recoger con medios propios o mediante cubetos, o derrames que produzcan daño 0. - Sin afección	- Menor de 3.000 €.	- No afecta a la capacidad nominal - No pierdes redundancia máximo 6 h (inmediata).	- No existen sanción, pero existe una pérdida de imagen interna - Mala valoración encuestas, pero no hay reclamación.

Figura 13. Ponderación análisis de criticidad

Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo/sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia (fallos/año) y las consecuencias de los fallos (valores de 0-100). La matriz de criticidad mostrada en la figura 14 permite jerarquizar los sistemas en tres áreas:

- Área de sistemas No Críticos (Verde)
- Área de sistemas de Media Criticidad (Amarillo)
- Área de sistemas Críticos (Rojo)

Frecuencia Muy Alta	12	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	14
Frecuencia Alta	19	1	1	1	0	2	0	0	0	0	1	25
Frecuencia Media	87	14	19	10	5	4	0	0	0	0	1	140
Frecuencia Baja	5474	261	988	383	309	193	83	24	72	19	83	7889
	5592	276	1008	395	314	200	83	24	72	19	85	8068
Consecuencias	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	

Figura 14. Matriz de criticidad

#### 6.3.4.3. Valoración del riesgo económico

Una vez enunciados los problemas, se les debe asignar el impacto asociado a pérdidas de oportunidad y costes de mantenimiento anuales. En algunos casos, donde las pérdidas de oportunidad no han ocurrido aún, pero existe riesgo de que ocurran, podrá considerarse el riesgo adicional para tener en cuenta la probabilidad de que un evento mayor ocurra si otro evento ocurre antes.

En caso de ser utilizados los costes o pérdidas de oportunidad históricos, se deberá utilizar los datos disponibles para un período que dependerá del tipo de problema. El impacto asociado a un problema estará representado por la probabilidad de que ese problema se comporte de manera similar en el futuro, y se calculará multiplicando la probabilidad de fallo por la consecuencia o la frecuencia de fallo por la consecuencia.

#### 6.3.5. DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS RAÍCES

El Análisis Causa Raíz utiliza un estructura de árbol lógico para determinar la causa que provocó el fallo, es decir, presenta de manera secuencial todos los hechos desde el evento a través de los distintos modos de fallo, relacionando las causas y efectos, hasta llegar a las causas raíces del fallo. Las verdaderas causas raíces son descubiertas permitiendo que las evidencias físicas conduzcan al equipo hasta encontrar los factores que intervinieron para que ésta se produjeran.

El árbol lógico se puede dividir en dos fases: una fase inicial donde se define el problema, los modos de fallo y las hipótesis; y una segunda fase, fase de estudio, donde se alcanza la raíz del problema a través de la validación de una hipótesis. En la figura 15 se muestra un ejemplo de árbol lógico.

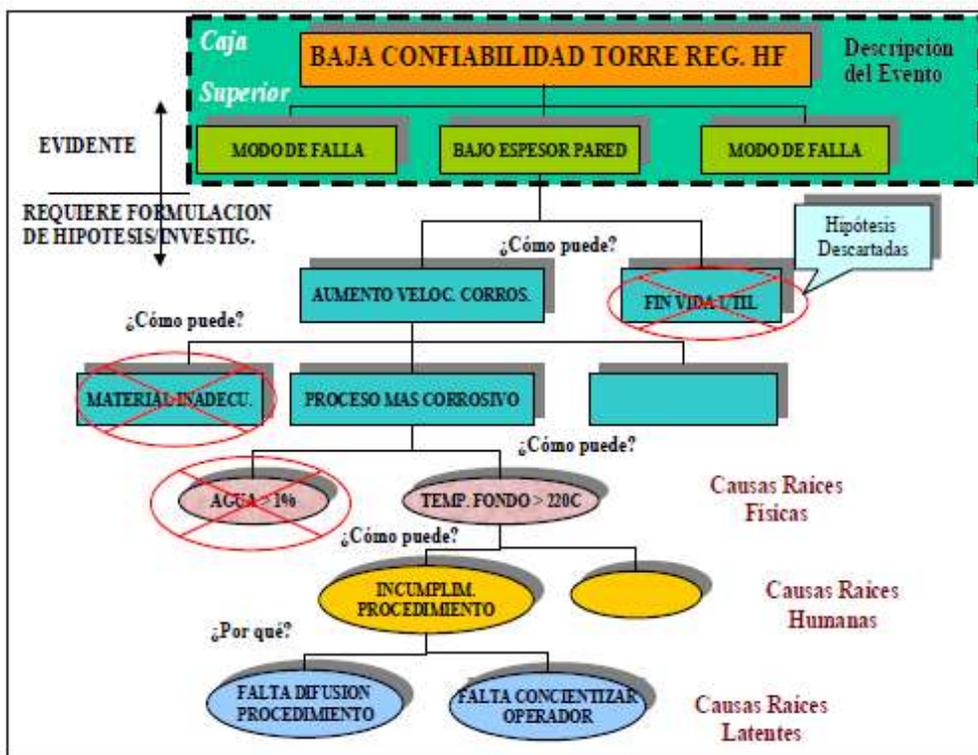


Figura 15. Árbol lógico

### 6.3.5.1. Modos de fallo

La fase de modo de fallo recoge la manera de cómo un sistema falló. Se trata de los eventos físicos encontrados una vez que ocurre el incidente. Todos los modos de fallo son resultado de la observación y recogen datos objetivos, no tratan hipótesis posibles. Un ejemplo de representación de los modos de fallo se puede observar en la figura 16.

Los modos de fallo pueden incluso crear diferentes tipos de metodología Análisis Causa Raíz, de modo que algunas veces el proceso esté orientado al análisis de fallos de alto impacto económico y otras veces más orientado al análisis de fallo recurrentes. La diferencia principal aparece en que los ACR basados en fallos de alto impacto como el objeto de este proyecto derivan de un solo modo de fallo pero muy grave y los ACR basados en problemas recurrentes ocurren a través de varios modos de fallos.



Figura 16. Ejemplo Modos de fallo para un problema

### 6.3.5.2. Hipótesis

Las hipótesis son una fase más del proceso secuencial del método para encontrar la causa raíz. Representan la transición entre los modos de fallo y la determinaciones de las causas raíces. En esta fase método se identifican las causas más probables por las que han podido ocurrir esos modos de fallo. Un ejemplo de representación de la fase de hipótesis puede observarse en la figura 17.

Todas las hipótesis identificadas forman la lista de posibles mecanismos que provocan los eventos de fallo en un sistema productivo. En el proceso de validación de hipótesis se deben tener en cuenta una serie de paradigmas como pueden ser comportamientos repetitivos, observar costumbres de las personas o el ambiente de trabajo. Es muy importante realizar una validación de hipótesis de forma objetiva puesto que cuando se verifica una hipótesis esta se convierte en causa raíz física.

Para el proceso de validación de las hipótesis hay utilizar toda la información técnica posible acerca del problema planteado, esta puede ser:

- Variable de operación del sistema
- Históricos de mantenimiento
- Diarios de eventos de cada uno de los turnos
- Resultados obtenidos tras inspecciones
- Datos de medición de vibraciones
- Procedimientos de mantenimiento
- Procedimientos operacionales
- Datos y modificaciones sobre el diseño

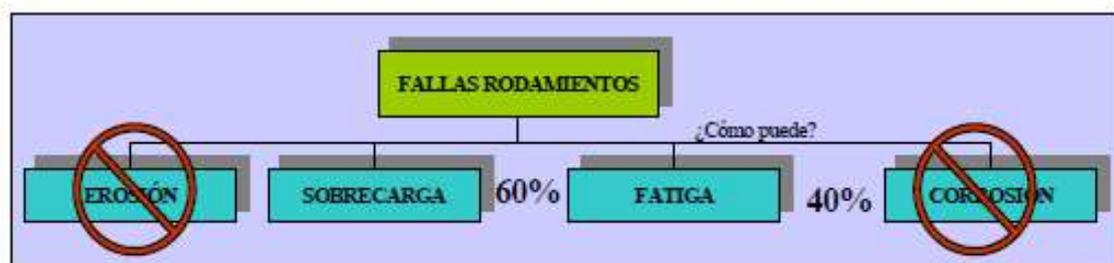


Figura 17. Ejemplo Hipótesis para un problema

### 6.3.5.3. Tipos de causas: física, humana y latente

Una vez validada una hipótesis a partir de la información técnica necesaria para ello se convierte en causa, la cual puede ser clasificada según los tres tipos que se definen a continuación (Figura 18):

- **Raíces físicas.** Son aquellas causas relacionadas con materiales o cosas tangibles. Se reúnen todas aquellas situaciones o manifestaciones de origen físico que afectan a la continuidad operativa de equipo o sistema.
- **Raíces humanas.** Son causas generadas por fallos debidos a las intervenciones inapropiadas de un ser humano. En este tipo de causa se clasifican todas aquellas

producidas por un error cometido por el factor humano y que inciden directa o indirectamente en la ocurrencia del fallo.

- **Raíces latentes.** Este tipo de causas está relacionado con la falta o deficiencia en los sistemas gerenciales y administrativos. Engloba todos aquellos problemas que, aunque nunca hayan ocurrido, es factible su ocurrencia.

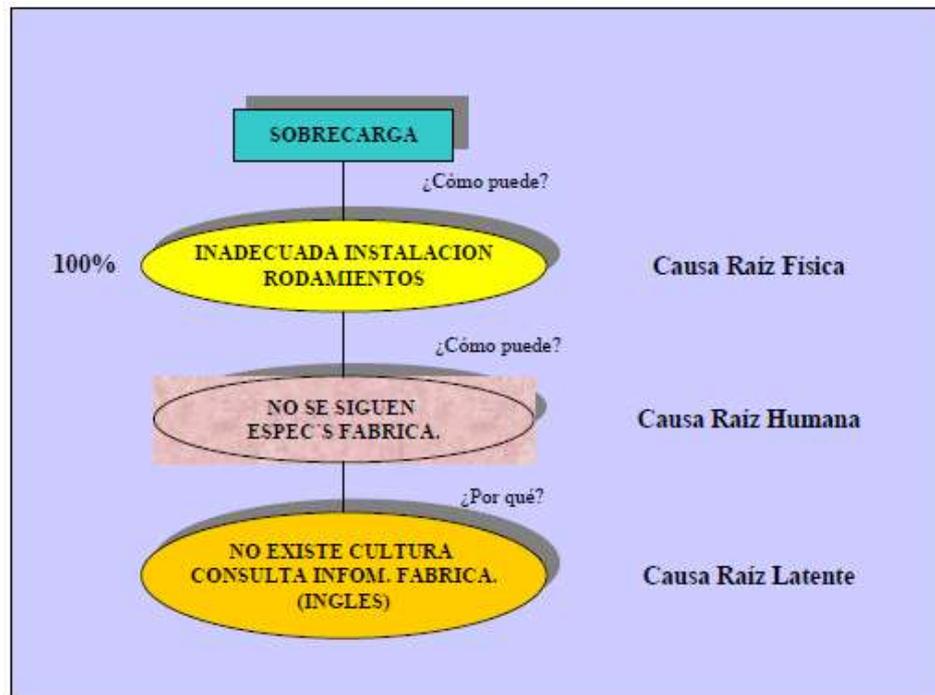


Figura 18. Tipos de causas

### 6.3.6. IMPLANTACIÓN DE SOLUCIONES

#### 6.3.6.1. Selección de las soluciones

Las soluciones a un problema deben seleccionarse si éstas evitan o al menos reducen la recurrencia del fallo o problema. Por otra parte, la solución debe soportarse en un Análisis Coste Beneficio Riesgo que justifique su aplicación. Esto significa que, a menos que la recurrencia del fallo genere problemas legales, la solución planteada solo desde el punto de vista técnico no es suficiente. Además, se tiene que verificar que la solución tenga vigencia en el tiempo.

Existen básicamente dos tipos de soluciones que pueden plantearse una vez finalizado un ACR:

1. Recomendaciones necesarias para solucionar la causa raíz física y latente, resolviéndose totalmente la contribución de esa rama a la ocurrencia del fallo. Es el tipo de solución más común.
2. Recomendaciones que resuelven la causa raíz física y latente en un ramal, y también las causas raíces de otros ramales.

#### 6.3.6.2. Efectividad de las soluciones

Tras aplicar la solución escogida hay que evaluar la efectividad de ésta. Para ello se debe evaluar el funcionamiento del equipo o sistema, de modo que se examina si la medida adoptada para solucionar el problema ha sido efectiva. Se plantean dos opciones (sí o no):

- **Sí es efectiva.** Se debe estandarizar la solución tomada, es decir, generar un informe donde se recoja lo realizado, cómo y qué mejora se ha obtenido. De este modo, cuando pueda producirse otro fallo igual o relacionado, habrá documentación a la que poder recurrir.
- **No es efectiva.** Si la solución adoptada no ha resultado positiva y no se ha conseguido obtener una mejora, se deben desarrollar nuevas teorías para obtener otras soluciones que consigan poner fin al problema.

#### 6.3.6.3. Lecciones aprendidas

El proceso finaliza con una conclusión sobre el trabajo realizado, en cuanto al estudio realizado previamente, lo que se ha descubierto durante el desarrollo del árbol lógico y las conclusiones a las que se llega tras la implantación y medición de las soluciones propuestas.

## 7. APLICACIÓN DEL MÉTODO “ANÁLISIS CAUSA RAIZ”

### 7.1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto se ha aplicado la metodología PROACT en la bomba primaria 21-P-04B situada en el tanque nº 4 21-T-04. Es una bomba centrífuga criogénica modelo 60777 fabricada por la empresa J.C. Carter, actualmente perteneciente a NIKKISO CRYO INC. El motivo de la aplicación de la metodología surge debido a un fallo durante el aumento de caudal en mayo del 2018.



Figura 19. Planta de Regasificación GNL

### 7.2. ANTECEDENTES

La bomba primaria 21-P-04B perteneciente al tanque 21-T-04, con una capacidad de 150.000 m<sup>3</sup>, fue puesta en marcha a finales del 2011. Esta bomba primaria tiene como objetivo extraer GNL (Gas Natural en estado líquido) del tanque, operar en procesos de carga y descarga de GNL a buques, en la producción normal de la planta y en la carga de cisternas.

A esta bomba no se le han realizado grandes mantenimientos puesto que tiene 6.910 horas de operación y, según el fabricante J.C. Carter, se le debe realizar mantenimiento cada 16.000 horas de operación, si esta se encuentra trabajando en condiciones de operación dentro de los límites establecidos.

A pesar de que el caudal mínimo establecido para esta bomba es 150 m<sup>3</sup>/h y el caudal de diseño 440 m<sup>3</sup>/h, la bomba estuvo trabajando durante un cierto periodo de tiempo con un caudal de recirculación en torno a 70 m<sup>3</sup>/h, debido al estado en que se encontraba la planta en ese momento. La bajada de caudal fue gradual, en escalones, intentando reducir el gas *boil-off* generado en la planta para mantener la temperatura del GNL almacenado en el tanque. Cabe destacar que el equipo no se modificó para trabajar en estas condiciones a pesar de que estaba trabajando fuera de su rango normal de funcionamiento.

El 21 de mayo de 2018 se requiere aumentar el caudal de impulsión de dicha bomba primaria a 310 m<sup>3</sup>/h para atender la demanda, pero la presión de descarga apenas alcanza los 6 bares. La presión esperada y necesaria para operar en estas condiciones debía ser 13 bares. Para su inspección en el taller, la bomba del tanque se extrae y en la operación de extracción de la

bomba los operadores que la están realizando observan que en la parte superior del motor de la bomba hay partículas metálicas, tal y como se observa en la figura 20.



Figura 20. Parte superior de la bomba 21-P-04B

En el desmontaje de la bomba en el taller, se encuentra que los daños están ubicados en la parte hidráulica de la bomba. Concretamente en la segunda etapa, en el impulsor y la membrana del difusor. Se observa que existe contacto entre el impulsor y la membrana del difusor y ambas están dañadas (figuras 21 y 22).



Figura 21. Daños en el impulsor 1



Figura 22. Daños en el impulsor 2

El resto de etapas de la bomba están afectadas por el traslado de las partículas metálicas desde la segunda etapa a la primera y tercera (figuras 23 y 24). También se observan esquirlas en el motor y restos de la bomba, pero no afectan a las partes críticas. Los desgastes en el resto de la bomba se consideran normales.



Figura 23. Etapa 1



Figura 24. Esquirlas en etapa 3

Cabe destacar que en el motor, en el tambor de equilibrio, en los rodamientos radiales y de empuje tampoco se observan daños ni desgastes significativos. Además, el inductor está en buen estado por lo que se puede considerar que no hubo partículas en el pote donde está ubicada la bomba.

En el momento de la falta de presión al aumentar el caudal de la bomba, no se produjo ningún *shut down* automático (parada del equipo de forma automática mediante el sistema de control que hay implementado en la planta), debido a que este equipo solo tiene configurado el disparo por muy bajo caudal y esa consigna de disparo se encontraba anulada ya que la bomba trabajaba por debajo del caudal mínimo permitido.

Tras lo ocurrido, se sustituye dicha bomba por la 21-P-04C y se impulsa el desarrollo del estudio Análisis Causa Raíz objeto de este proyecto. Con ello, se quiere conocer cuál ha sido la raíz del problema.

### 7.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

#### 7.3.1. ¿QUÉ? ¿CUANDO? ¿DONDE?

- **¿Qué?** *Qué fue lo que ocurrió y cuáles fueron los síntomas*

Al solicitar a la bomba primaria 21-P-04B un aumento de caudal a 310 m<sup>3</sup>/h la presión de operación que debería haber alcanzado los 13 bares sólo llegó a 6 bares. En principio, la bomba no presentaba síntomas aparentes que pudieran conducir al paro del sistema.

- **¿Cuándo?** *Cuándo ocurrió*

El hecho en cuestión ocurrió el 21 de mayo de 2018 al intentar poner en marcha en las condiciones requeridas por necesidades de producción de la planta.

**¿Dónde?** *Dónde ocurrió el problema* En la planta de Regasificación de SAGGAS, concretamente en el área de almacenamiento en el tanque de GNL 21-T-04.

#### 7.3.2. EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo que se conforma para tratar el problema integra a los siguientes responsables, en el cual se dará el cargo que desempeña cada uno en el proyecto, pero no se adjuntan los nombres personales de cada uno por privacidad de la empresa.

- **Facilitador y programador:** Becaria del departamento de mantenimiento
- **Responsable del mantenimiento mecánico:** Técnico de mantenimiento mecánico de la planta
- **Responsable del mantenimiento eléctrico e instrumentación:** Técnico de mantenimiento eléctrico e instrumentación de la planta
- **Responsable de operaciones:** Jefe de operaciones de la planta
- **Especialistas:** Operador de instrumentación y un jefe de turno

## 7.4. DEFINICIÓN DEL SISTEMA

### 7.4.1. SITUACIÓN E HISTORIA DE LA INSTALACIÓN

#### 7.4.1.1. Situación

La planta de Regasificación de Sagunto S.A. (Saggas) es la sociedad propietaria de la planta de regasificación de Sagunto y la encargada de su operación comercial y mantenimiento. La planta se ubica en una parcela de 22 hectáreas ganadas al mar, en el extremo del contradique sur del puerto de Sagunto.

Dispone de una capacidad de almacenamiento de GNL de 600.000 m<sup>3</sup> distribuida en cuatro tanques idénticos criogénicos de 150.000 m<sup>3</sup>, cinco vaporizadores de agua de mar y uno de combustión sumergida consiguiendo una capacidad nominal de regasificación de 1.000.000 Nm<sup>3</sup>/h.

Saggas es la propietaria del gasoducto de transporte de 7,5 km de longitud que conecta la planta con la red de gasoductos de la empresa ENAGÁS Transporte.

#### 7.4.1.2. Historia de la instalación

La Planificación Energética de los Sectores de Gas y Electricidad 2002-2011 del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio fue la primera en recoger la instalación de Sagunto dentro del sistema gasista español.

Para la construcción, puesta en marcha, operación y mantenimiento de la planta se creó la sociedad Planta de Regasificación de Sagunto S.A., la cual fue promovida inicialmente por Unión Fenosa Gas, y a la que posteriormente se incorporaron Iberdrola, Endesa y Omán Oil Holdings Spain. Más tarde, Iberdrola y Endesa vendieron su participación en Saggas a Deutsche Asset & Wealth Management y Osaka Gas UK, respectivamente. Posteriormente, tanto Deutsche Asset & Wealth Management como Unión Fenosa Gas vendieron sus participaciones a Enagás Transportes. En la actualidad, las acciones de la empresa están distribuidas tal y como se muestra en la siguiente ilustración.

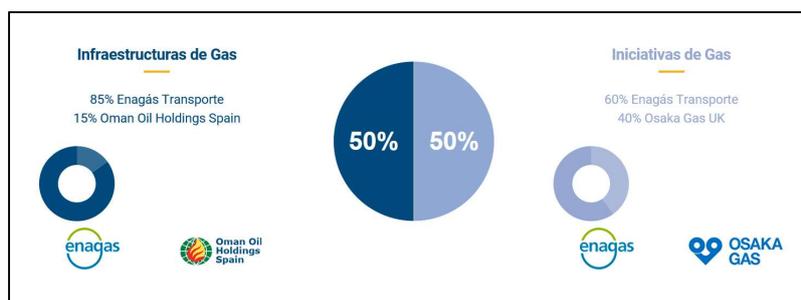


Figura 25. Accionistas de la organización

La Autoridad Portuaria de Valencia entregó a Saggas la parcela de 22 hectáreas donde está ubicada la planta entre marzo y octubre de 2003. Tras un periodo de construcción de tres años aproximadamente, la planta entró en operación comercial el 1 de abril de 2006 y fue inaugurada el 26 de junio de ese mismo año. En la figura 26 de detallan los hitos más importantes de la historia de la infraestructura.



Figura 26. Evolución de la instalación

La inversión inicial fue de 325 millones de euros, que junto con las distintas ampliaciones posteriores hace una inversión total superior a los 500 millones de euros.

## 7.4.2. DEFINICIÓN Y DIAGRAMA DE PROCESO

### 7.4.2.1. Definición del proceso productivo

El proceso productivo que se desarrolla en la planta de regasificación de Sagunto abarca la recepción, almacenamiento y expedición de gas natural, así como el servicio de trasvase de GNL a buques.

A continuación, se detallan todos los procesos que se realizan en la planta desde que llega el GNL transportado por buques metaneros desde los países productores hasta que este sale de la planta por los diferentes medios. Estos procesos son:

1. **Recepción del gas natural.** El gas natural se recibe en estado líquido transportado en barcos metaneros a una temperatura de  $-160^{\circ}\text{C}$  desde las plantas de licuefacción. Los buques atracan en el muelle de descarga de la planta de regasificación y se descarga el GNL a través de tres brazos ubicados en el muelle.
2. **Almacenamiento del GNL.** El GNL circula a través de los conductos que unen los brazos con los tanques y se almacena en el interior de los mismos a una temperatura de  $-160^{\circ}\text{C}$ . En uno de los 4 tanques de la instalación está situado el equipo de bombeo primario objeto de este análisis.
3. **Gestión del gas de boil-off.** El aporte de calor al GNL (proceso de bombeo, radiación solar, transmisión de calor desde la losa de cimentación) provoca que una fracción de éste pase a fase vapor. Este gas (Boil Off) se utiliza para:
  - a. Compensar el desplazamiento de la carga que se origina en el proceso de descarga del buque.
  - b. Ser reintroducido en el proceso gracias al relicuador (tras pasar por unos compresores).
  - c. Ser inyectado en el gasoducto de salida de la planta cuando no es posible su reintroducción en el proceso.
  - d. Ser quemado en la antorcha cuando no es posible su eliminación en algunas de las alternativas anteriores.

4. **Relicador.** Un sistema de bombeo ubicado en el interior del tanque, denominado primario, permite la conducción del GNL hacia el relicador, que actúa como acumulador líquido para las bombas secundarias y permite la recuperación del Boil Off, incorporándolo a la corriente de GNL.
5. **Bombeo de alta presión.** El GNL procedente del relicador es bombeado a alta presión por un sistema de bombeo secundario, de diseño análogo al primario, que impulsa al GNL hacia los vaporizadores.
6. **Vaporización.** El paso de líquido a gas se realiza en los vaporizadores de agua de mar. A través de éstos, el gas natural cambia de estado al ser calentado con agua de mar. Existe un vaporizador, denominado de combustión sumergida, utilizado en periodos de mantenimiento de los anteriores o en épocas de demanda punta, donde el GNL es calentado y vaporizado por efecto de un quemador sumergido que utiliza como combustible el gas natural.
7. **Medida y odorización.** El gas natural procedente de los vaporizadores se dirige a través de un colector común a unos sistemas de medida y odorización, y, finalmente, se introduce en la Red Básica de Gasoductos.
8. **Carga de cisternas.** El GNL puede ser cargado directamente desde los tanques en camiones cisterna.
9. **Carga de buques.** También es posible la recarga de GNL en buques metaneros gracias a la utilización de las bombas primarias de los tanques.

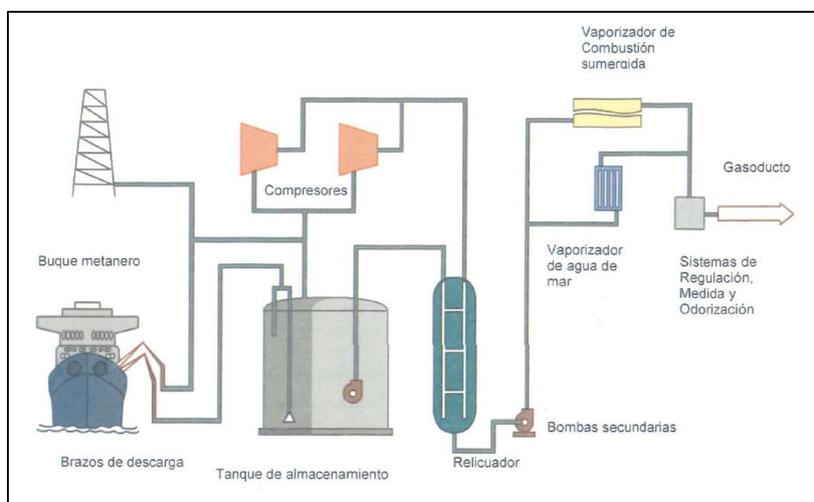


Figura 27. Proceso productivo

#### 7.4.2.2. Definición del proceso de almacenamiento del producto

España apenas dispone de yacimiento de gas natural, de forma que se hace necesaria su importación de los países productores, bien a través de gasoductos o a través de buques metaneros.

En la actualidad, el gas natural es el combustible fósil más limpio y eficiente, por ello se ha convertido en una de las principales fuentes energéticas. Entre los factores del incremento

de la demanda de gas natural se encuentra el consumo generado por las centrales de generación eléctrica. En un contexto social donde se demandan fuentes de energía de bajo impacto ambiental, el gas natural se posiciona de forma preferente frente a otras por su capacidad de apoyo en las fuentes de energía renovable.

Por lo tanto, el gas natural con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y tecnologías eficientes y seguras, es una fuente energética clave para contribuir al desarrollo sostenible.

Las características que diferencian al gas natural de otros combustibles fósiles son las siguientes: no contiene azufre (tan sólo el correspondiente al odorizante), carece de compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos pesados y otras impurezas, y su contenido en metales es prácticamente inapreciable.

Además de todas las características nombradas anteriormente, el gas natural es incoloro, inodoro, no tóxico e inflamable. El principal componente del gas natural es el metano CH<sub>4</sub> por lo que en su combustión emite menor cantidad de dióxido de carbono que cualquier otro combustible fósil.

El gas natural es almacenado en estado líquido puesto que un m<sup>3</sup> de gas natural licuado equivale, aproximadamente, a 600 m<sup>3</sup> de gas natural en estado gaseoso, en condiciones normales de presión y temperatura.

En la figura 28 se muestra la cadena del gas desde su extracción en los países productores hasta la distribución y transporte a hogares e industria.

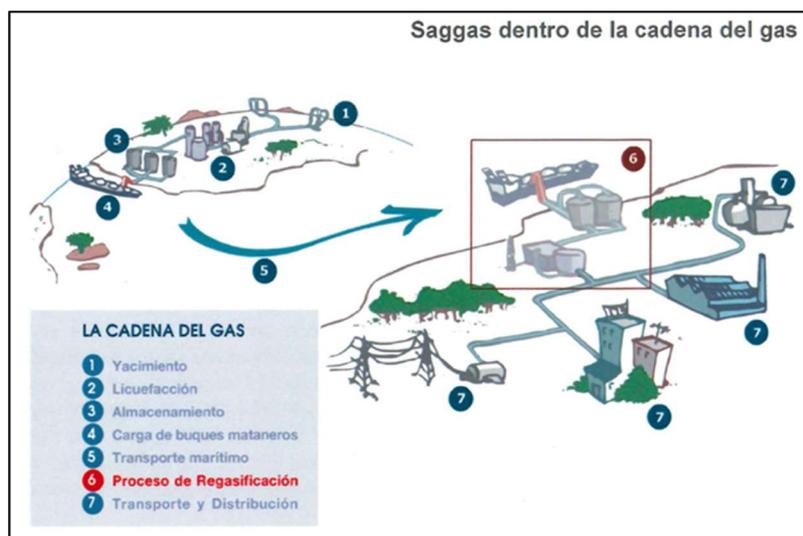


Figura 28. Proceso de almacenamiento del gas natural

#### 7.4.2.3. Diagrama de proceso del equipo

El principal objetivo de los equipos de bombeo primario que hay instalados en el interior de los tanques de GNL es impulsar el producto desde el interior de los tanques hacia el proceso productivo. En la figura 29 se muestra el diagrama de proceso de una bomba primaria.

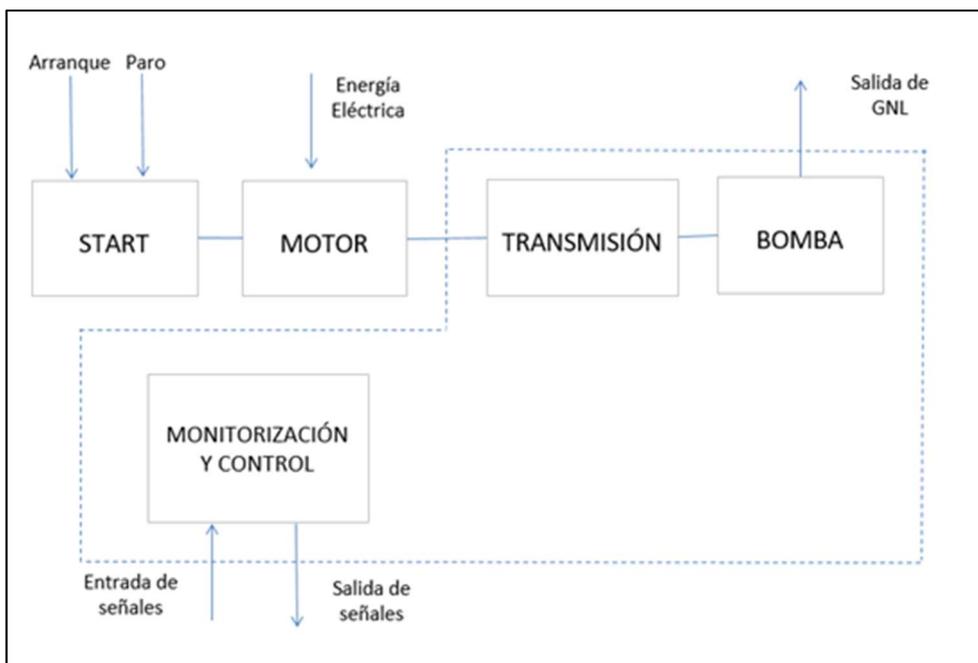


Figura 29. Diagrama de proceso de una bomba primaria

### 7.4.3. CONTEXTO OPERACIONAL

#### 7.4.3.1. Filosofía Operacional

En el interior de los tanques hay instaladas bombas primarias cuya función principal es impulsar el GNL almacenado a las siguientes etapas del proceso, bombeo secundario, carga de cisternas, atraque para carga/descarga de buques y a líneas de proceso para mantenimiento en frío.

Estas bombas centrífugas están sumergidas en el GNL del interior de los tanques. Su capacidad está seleccionada en relación con el volumen del tanque y el número de bombas instaladas en el mismo, siendo su presión de bombeo similar al verter todas a un mismo colector de impulsión. En el tanque 21-T-04 hay instaladas tres bombas de 440 m<sup>3</sup>/h de capacidad cada una.

Tanto el motor como la bomba se encuentran completamente sumergidos en el gas natural licuado. Debido a las condiciones en las que se encuentra el fluido de trabajo (-160 °C), la cubierta está aislada para minimizar las pérdidas de frío. En la figura 30 se muestra como está colocada la bomba dentro de la columna del tanque y los cables e instrumentos que forman parte del sistema de impulsión de este equipo.

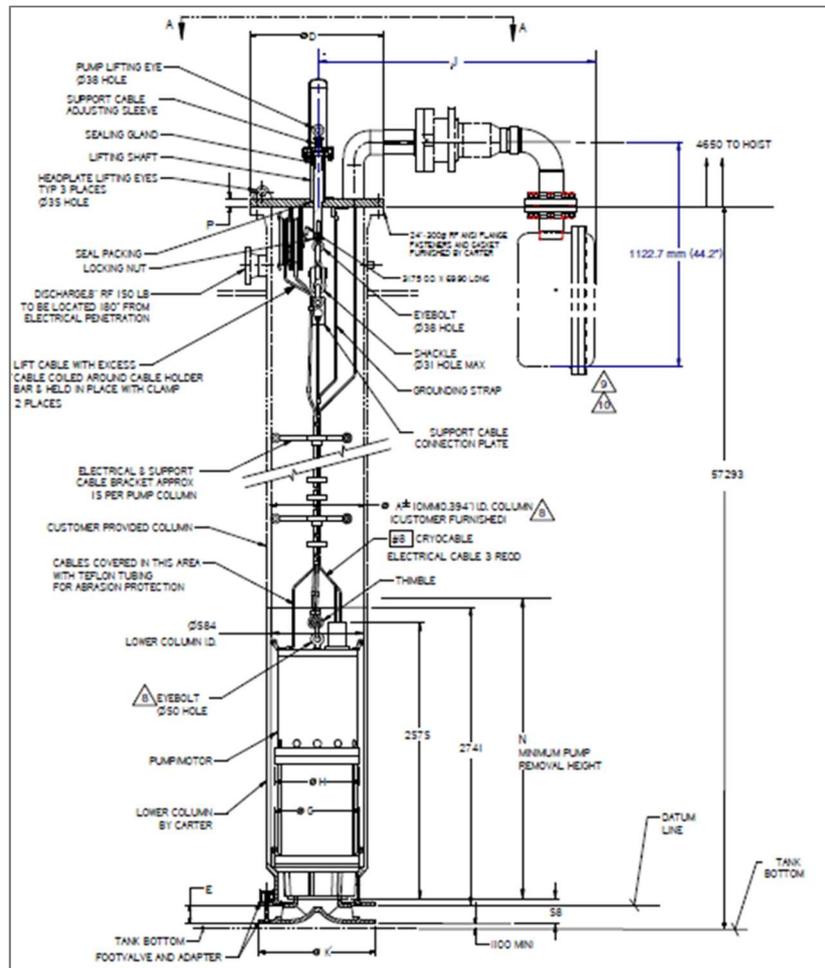


Figura 30. Situación del equipo dentro del tanque

Los principales elementos que conforman estas bombas centrífugas criogénicas de tres etapas son los siguientes:

- **Impulsor o rodete:** está formado por una serie de álabes que giran dentro de una carcasa circular, van unidos al eje y es la parte móvil de la bomba. En estas hay tres impulsores debido a que son bombas de 3 etapas.
- **Carcasa:** es la capa superficial que protege a todos los elementos que forman parte del equipo, está fabricada de materiales inoxidables.
- **Eje:** es una pieza en forma de barra de sección circular que se fija rigidamente sobre el impulsor y le transmite la fuerza al elemento motor.
- **Cojinete:** constituye el soporte y la guía del eje. Esta parte debe ser elaborada con cuidado ya que permitirá la perfecta alineación de todas las partes.
- **Difusor:** está situado junto al impulsor dentro del cuerpo de la bomba. Al incrementar la velocidad, el agua disminuirá y contribuirá a transformar la energía cinética en energía potencial, mejorando el rendimiento de la bomba. En esta hay tres difusores ya que es una bomba de tres etapas.

En la figura 31 se muestran los elementos descritos anteriormente, en ella se observa que la bomba dispone de tres etapas de impulsión.

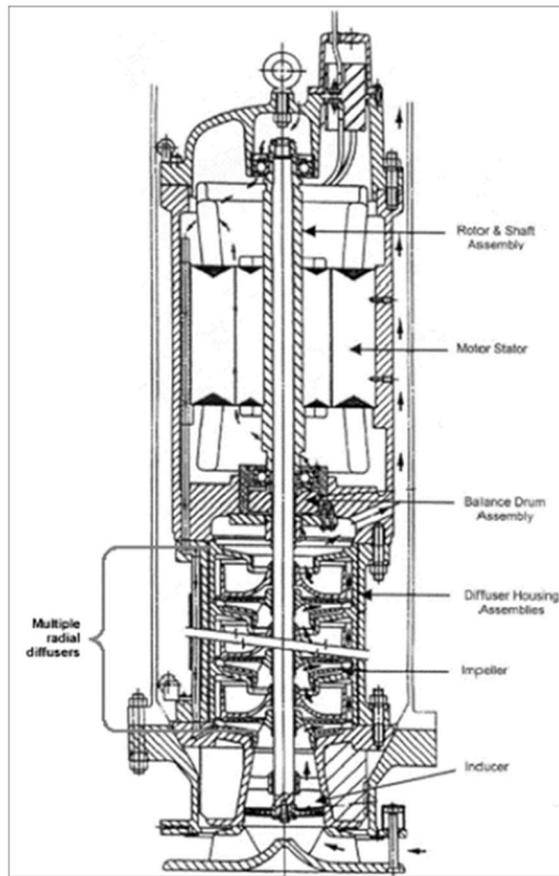


Figura 31. Bomba centrífuga sumergida

#### 7.4.3.2. Datos de diseño de la bomba

A continuación, se indican los datos de diseño de la bomba primaria 21-P-04 objeto del análisis.

- Fabricante: J.C. Carter
- Año de fabricación: 2009
- Nº de parte: A60777R3-47545-96-2
- Modelo: 60777
- Fluido de servicio: GNL
- Temperatura nominal: -160 °C
- Densidad específica nominal: 0.427
- Caudal nominal: 440 m<sup>3</sup>/h
- Altura nominal: 309 m
- Revoluciones: 2960 rpm
- Tensión de suministro: 6600V/50 Hz/3F
- Corriente a plena carga: 28 A
- Corriente de arranque: 176 A
- Potencia nominal motor: 250 kW
- Peso 1152 kg

## 7.5. JERARQUIZACIÓN DEL PROBLEMA

### 7.5.1. ANÁLISIS DEL IMPACTO

El fallo de la bomba primaria ha implicado que esta ha dejado de cumplir su función. El impacto por no cumplir su función fue analizado en el estudio de criticidad llevado a cabo el año anterior, donde este equipo obtuvo la siguiente puntuación:

- Grupo de interés público: Medio
- Coste de mantenimiento: Alto
- Eficacia operativa: Alto
- Seguridad Industrial: Moderado
- Medioambiente: Leve

Grupo interés público	Coste de mantenimiento	Eficacia operativa	Seguridad industrial	Medioambiente
M	A	A	MD	L

Figura 32. Análisis de criticidad del equipo

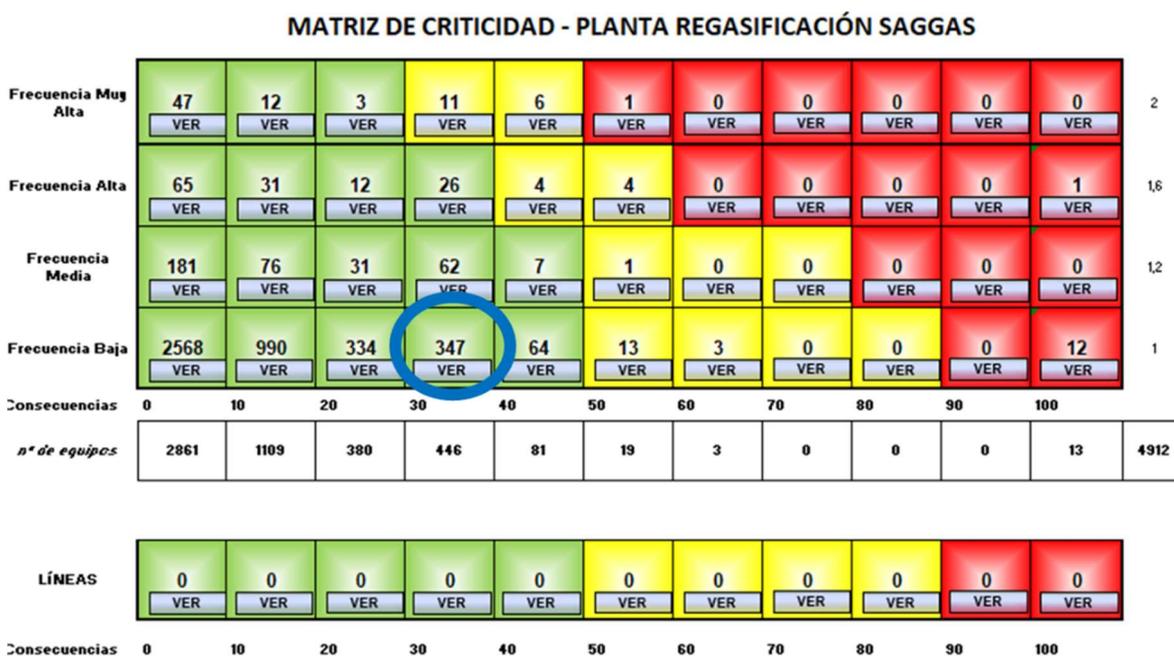


Figura 33. Matriz de criticidad SAGGAS

De forma cuantitativa y teniendo en cuenta la frecuencia de fallo de esta bomba, la puntuación total es de 39. Se concluye que es un equipo de bajo impacto en la instalación puesto que hay dos bombas más en el tanque, pero su coste de mantenimiento es elevado.

### 7.5.2. VALORACIÓN DE LA PÉRDIDA OCASIONADA

Una vez establecido el impacto y las valoraciones que se hacen del problema, se obtienen los valores numéricos asociados a las pérdidas a partir de Análisis Coste Riesgo Beneficio, los valores que se obtienen son los siguientes:

- **Coste de los materiales:** El coste de los materiales necesarios para la reparación de la bomba primaria asciende a los 58.475,61 €. Este coste tan elevado es debido a que es un equipo muy específico y con unas características concretas diseñadas especialmente para esta planta, por tanto, todos estos repuestos tienen que ser suministrados por el fabricante del equipo.
- **Coste de la mano de obra:** El coste de la mano de obra asciende a 8.232,06 € ya que en esta reparación han participado tanto operadores mecánicos de la planta, operadores mecánicos de la contrata integral y un ingeniero de la empresa fabricante del equipo. Además, ha sido necesario contratar diversas empresas externas para la realización de tareas auxiliares a la reparación.
- **Indisponibilidad del equipo:** El equipo permanece inoperativo durante 24 meses.
- **Pérdidas de producción:** La indisponibilidad de este equipo no supone una pérdida de productividad a la planta puesto que en ese tanque hay instaladas dos bombas primarias más las cuales permanecen operativas.

En la figura 34 se muestra el coste de la reparación de la bomba desglosado por materiales necesarios para la reparación y tipos de mano de obra que han intervenido en el proceso.

<b>COSTE DE LA REPARACIÓN DE LA BOMBA 21-P-04B</b>		
<b>COSTE DE LOS MATERIALES.....</b>		<b>58.475,61 €</b>
Repuesto:	Uds.	Coste
DIFFUSER HOUSING ASSEMBLY (REP PN 45694)	1	40.250,00 €
INDUCER SLEEVE (REPAIR KIT)	1	610,73 €
IMPELLER PN 240364-1	1	6.540,00 €
IGV BUSHING PN 240457	1	600,00 €
BUSHING PN 230-410	1	525,00 €
Wear Ring 230397/ 1A - Anillo desgaste	1	2.175,00 €
BALL BEARING P/N 6314	1	4.990,00 €
Collet PN: 201.488/ 61A -Anillo metálico	1	1.024,88 €
IMPELLER REPAIR JCC PN 240364-1	2	1.750,00 €
<b>COSTE DE LA MANO DE OBRA.....</b>		<b>8.232,06 €</b>
Puesto de trabajo:		Coste
Operadores mecánicos SAGGAS		1.204,75 €
Operadores mecánicos Contrata Integral		1.600,06 €
Ingeniero empresa fabricante del equipo		3.827,35 €
Equipos de elevación		126,00 €
Montaje/Desmontaje de andamios		796,53 €
Montaje/Desmontaje aislamientos		677,37 €
<b>COSTE TOTAL:</b>		<b>66.707,67 €</b>

Figura 34. Valoración del coste de la reparación

## 7.6. DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS RAÍCES

### 7.6.1. ANÁLISIS PREVIOS

El tiempo medio entre mantenimiento (MTBM) recomendado por el fabricante J.C. Carter-Nikkiso para las bombas primarias del tanque 21-T-04 en esta planta está en torno a las 16.000 horas de operación. La bomba había trabajado 6.910 horas en el momento del fallo, por lo que aún tenía un margen amplio de trabajo hasta llegar a su MTBM.

Previo al estudio causa raíz, se solicita a Nikkiso una visita en noviembre de 2018 con el objetivo de conocer las causas del fallo acontecido. Para ello, se realizó un informe analizando la información relacionada con el fallo a partir de las curvas obtenidas desde el DCS (Sistema de control).

En la figura 35 se observa las curvas de presión, caudal y arranque de la bomba en el momento del fallo.



Figura 35. Curvas DCS instante del fallo

En la curva verde se observa el caudal que se le solicita a la bomba; en ella se puede apreciar que cuando el caudal sube cae la presión (curva amarilla) a valores muy por debajo de la curva presión-caudal característica de la bomba. En la curva morada se puede observar el arranque del segundo equipo con un comportamiento normal y el que se hubiera esperado de la bomba del estudio.

En la figura 36 se compara la presión alcanzada por la bomba en el momento del fallo, representada en color azul, comparada con la esperada, representada en color verde.



Figura 36. Comparación entre curva esperada y real

Adicionalmente, se detectó en el análisis de información de PI que el 12 de mayo del mismo año de la avería, hubo un descenso progresivo de presión hasta disminuir un total de 2 bares en 12 horas (figura 37), acompañado de un evento de severidad 4 detectado por el sistema de vibraciones, cuya señal se perdió tras detectar este suceso.

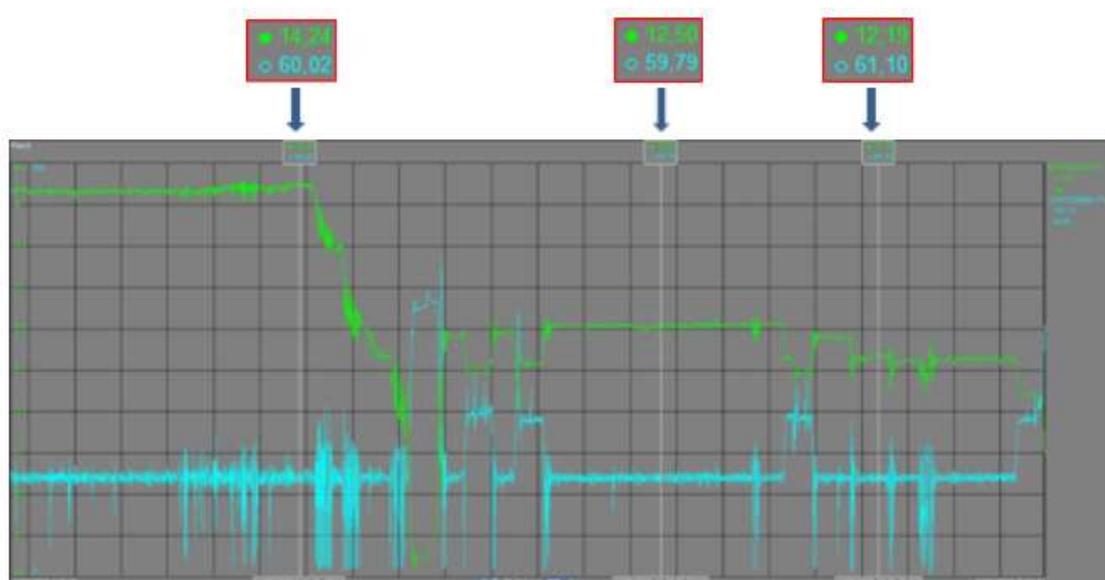


Figura 37. Curvas de la caída de la presión

Nuevamente, el 17 de mayo del mismo año de la avería, tras recuperar la señal perdida, ocurre otro evento de severidad 4 detectado por el sistema de vibraciones.

Con esta información, y tras efectuar una revisión del equipo afectado en la propia instalación, Nikkiso emite un informe, en el cual concluyen que el modo de fallo es la ruptura de la membrana del difusor, creando así un daño catastrófico en la parte posterior del impulsor, lo que genera gran cantidad de fragmentos. Se puntualiza que los daños secundarios son consecuencia de la migración de los fragmentos anteriores a través de la bomba.

En la investigación para entender qué es lo que ha podido ocurrir se barajan las siguientes posibilidades, con las siguientes conclusiones:

- El collarín cónico de fijación del impulsor al eje parecía que estaba suelto lo que podría haber originado el fallo. Nikkiso indica que por la geometría cónica y disposición del collarín el efecto habría sido el contrario al ocurrido, golpeando el impulsor con su parte frontal sobre el anterior difusor y no por su trasera con el siguiente.
- Membrana del difusor de 3mm de espesor y sistema de fijación diseñados deficientemente. Nikkiso hizo estudios de tensiones, no resultando concluyentes.

En ese mismo informe se proponen una serie de acciones correctoras relacionadas con el refuerzo del inductor, mejoras en el plato difusor e impulsor y mejorar la fijación con tornillos especiales. Nikkiso no se pronunció con respecto al número de arranques ni al tiempo al que han trabajado por un caudal por debajo del rango de operación permitido. Para poder llegar a conocer la causa raíz que originó el fallo posterior se realiza el análisis causa raíz.

### 7.6.2. DEFINICIÓN Y PRIORIZACIÓN DE MODOS DE FALLO

Analizando el historial de la bomba y a partir de la observación se definen los modos de fallo del equipo, es decir, la manera en la que falló el equipo con información contratada y objetiva. Los modos de fallo que se identifican son los siguientes:

- Factores operacionales
- Problemas de instrumentación
- Problemas eléctricos
- Diseño y fabricación
- Montaje
- Instalación en campo

En la figura 38 se muestra los modos de fallo nombrados anteriormente dentro del árbol lógico del análisis.

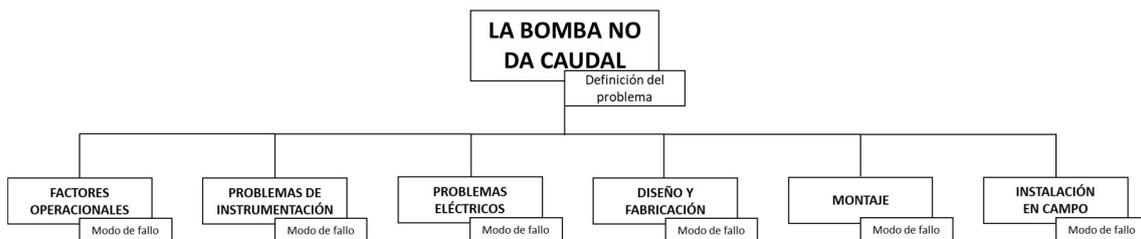


Figura 38. Modos de fallo (Árbol lógico)

### 7.6.3. DEFINICIÓN Y VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

#### 7.6.3.1. Definición de las hipótesis

Las hipótesis conforman la lista de posibles mecanismos que provocan los eventos de fallo. Se identifican las causas más probables por las que han podido ocurrir esos modos de fallo. A partir de los modos de fallo identificados en el apartado anterior, se definen las siguientes hipótesis.

- **Factores operacionales**
  - Modo de funcionamiento de la FV
  - Número de arranques de la bomba
  - Horas de operación
  - Nivel del tanque
  - Caudal mínimo de recirculación/operación
  - Incremento de la temperatura de aspiración/impulsión
  - Alto nivel de vibraciones
  - Calidad del GNL
  - Fluctuaciones de caudal
    - Error de medida caudal
    - Mal funcionamiento FV
    - Variable de proceso
- **Problemas de instrumentación**
  - Errores de medida
  - Alarmas/disparos
  - Sistema de monitorización de vibraciones
- **Problemas eléctricos**
  - Suministro de red
  - Protección eléctrica
  - Inversión de las fases
- **Diseño y fabricación**
  - Materiales
  - Ajustes
  - Plato difusor y rodamiento aspiración
- **Montaje**
  - No se sigue procedimiento
  - No se siguen los ajustes y tolerancias
- **Instalación en campo**
  - No se sigue procedimiento
  - Fallo cableado o soporte eléctrico
  - Apertura de la válvula de pie FALTA PALABRA

Además de definir las hipótesis y subhipótesis a partir de las cuales se han producido los modos de fallo, se tiene que identificar los métodos utilizados para la validación de las hipótesis. En la figura 39 se establecen los métodos de verificación para cada una de la hipótesis.

## Aplicación de la metodología PROACT en una bomba centrífuga criogénica de GNL

Definición del problema	Definición de los modos de fallo	Definición de hipótesis y método de verificación	
¿qué es lo que ocurrió?	¿cómo puede ocurrir?	Hipótesis	Método de verificación
La bomba 21-p-04B no da caudal ante una solicitud por subida de producción	Factores Operacionales	Nivel del tanque	Comprobar si desde la puesta en marcha de la bomba ha estado trabajando por debajo del mínimo permitido por el fabricante
		Caudal mínimo de recirculación	Comprobar si desde la puesta en marcha ha trabajado con caudales de impulsión por debajo del mínimo permitido por el fabricante
		Calidad del GNL	Comprobar si desde la puesta en marcha ha trabajado con fluido de paso fuera de la especificación con respecto a los límites marcados por el fabricante
		Temperatura de aspiración e impulsión	Consultar condiciones de temperatura de aspiración e impulsión. Contrastar la temperatura de aspiración e impulsión contra la máxima admitida por el fabricante
		Fluctuaciones de caudal y error de medida en el caudal de paso	Verificar el correcto funcionamiento del caudalímetro, ya que en régimen permanente, se observan variaciones importantes del caudal de la bomba
		Fluctuaciones de caudal debidas al mal funcionamiento de la FV	Verificar el correcto funcionamiento de la FV puesto que en régimen permanente se observa variaciones importantes en el caudal del equipo que podrían haber contribuido al fallo del mismo.
		Fluctuaciones de caudal debido a variables de proceso	Analizar si existe alguna otra variable de proceso que afecte a las fluctuaciones de caudal observadas en el equipo en régimen permanente
		Modo de funcionamiento de la FV en automático o manual	Analizar si estando la FV en modo de operación manual, se había operado de forma correcta ante variaciones en el caudal de la bomba
		Número de arranques	Consultar sobre el impacto del número de arranques en las horas equivalentes al funcionamiento del equipo
		Horas de funcionamiento del equipo	Consultar las horas de funcionamiento del equipo para contrastar que se encuentran por debajo del límite fijado para el mantenimiento
	Alto nivel de vibraciones	Analizar los niveles de vibraciones en los meses previos al fallo	
	Problemas de instrumentación	Errores de medida	Verificar el correcto funcionamiento de toda la instrumentación asociada a las medidas de caudal de impulsión y nivel de tanque
		Alarmas/Disparos	Estudiar si los disparos de la bomba y las alarmas están configuradas con el criterio de diseño del equipo
		Sistema de monitoreo de vibraciones	Analizar la fiabilidad del sistema de monitoreo de vibraciones en la toma de decisiones relacionadas con el mantenimiento de estos equipos. Días antes del fallo este sistema generó eventos de severidad 4 en el equipo analizado y no se tuvieron en cuenta
	Problemas eléctricos	Suministro de red, protección eléctrica e inversión de fases	Analizar cada una de las hipótesis para verificar si existieron problemas eléctricos que pudieran estar relacionados con el fallo ocurrido en el equipo
	Diseño y fabricación	Materiales	Revisar el certificado de conformidad de fabricación, inspección y pruebas del equipo. Verificar ingeniería, fabricación y pruebas, e informe de puesta en marcha y pruebas de garantía
		Ajustes	Revisar el certificado de conformidad de fabricación, inspección y pruebas del equipo. Verificar ingeniería, fabricación y pruebas, e informe de puesta en marcha y pruebas de garantía
		Plato difusor y rodamiento de aspiración	Establecer contacto con el fabricante para verificar el correcto diseño de dichos elementos
	Montaje	No se sigue procedimiento	Revisar el certificado de conformidad de fabricación, inspección y pruebas del equipo. Verificar ingeniería, fabricación y pruebas, e informe de puesta en marcha y pruebas de garantía
		No se siguen ajustes y tolerancias	
Instalación en campo	No se sigue procedimiento	Revisar el certificado de conformidad de fabricación, inspección y pruebas del equipo. Verificar ingeniería, fabricación y pruebas, e informe de puesta en marcha y pruebas de garantía	
	Fallo en cableado o soporte eléctrico		
	Apertura de la válvula de pie		

*Figura 39. Definición del método de verificación de hipótesis*

A continuación, la figura 40 muestra el árbol lógico del método análisis causa raíz completo.

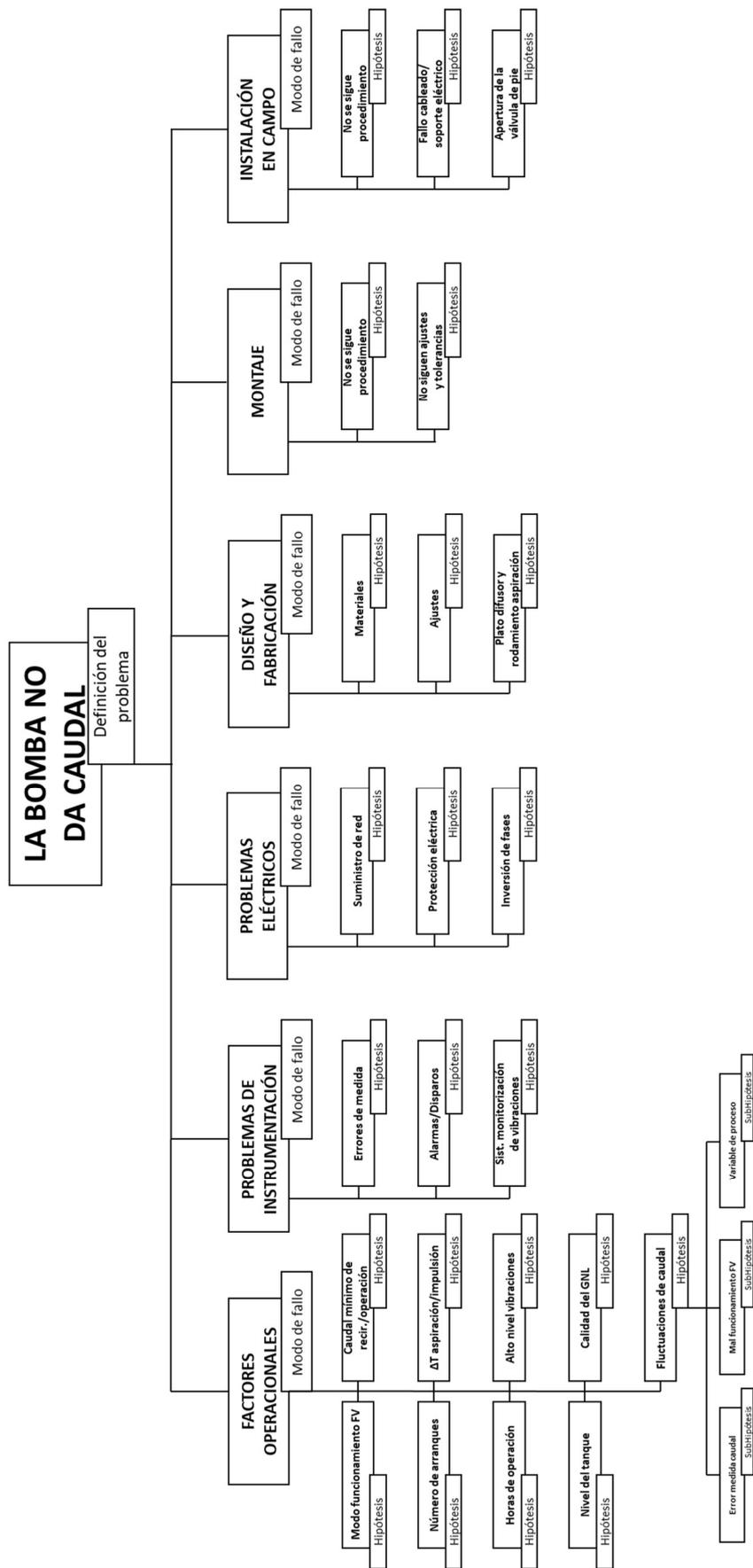


Figura 40. Árbol lógico completo

7.6.3.2. Desarrollo de las hipótesis

HIPÓTESIS nº1. NIVEL DEL TANQUE

La hipótesis número 1 pretende probar si la bomba trabajó con niveles de tanques por debajo del mínimo nivel admisible para su operación. Para desarrollar esta hipótesis se recurre a los valores de los niveles del tanque de GNL 21-T-04 almacenados en el servidor de PI.

Al no haberse ejecutado grandes mantenimientos sobre el equipo de bombeo, el estudio se circunscribe a los años de funcionamiento desde su puesta en marcha.

A continuación, se muestran las gráficas por año con los niveles de tanque y los límites de control establecidos (figuras 41-48). Tal y como se observa en las gráficas, los niveles de tanque no descendieron de los mínimos admisibles para la operación del equipo, excepto en momentos puntuales, en los que desde la instalación se ha confirmado que la bomba no fue arrancada.

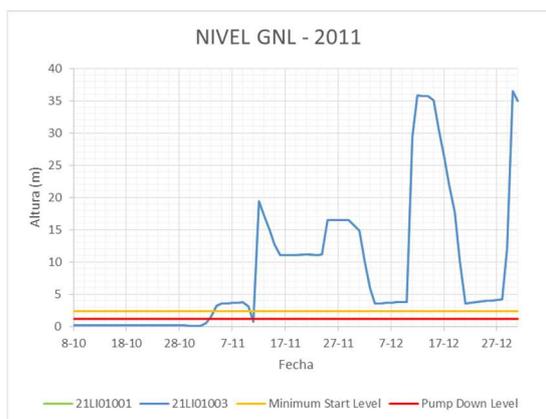


Figura 41. Nivel del tanque 2011

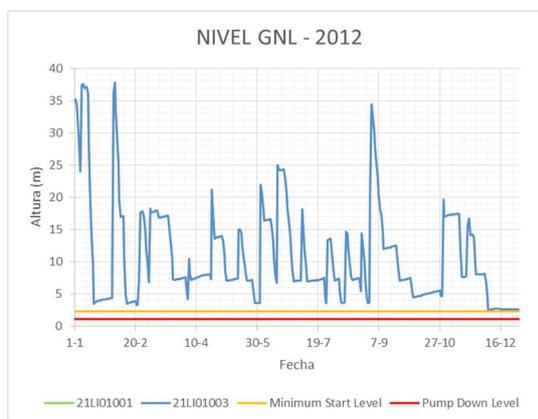


Figura 42. Nivel del tanque 2012

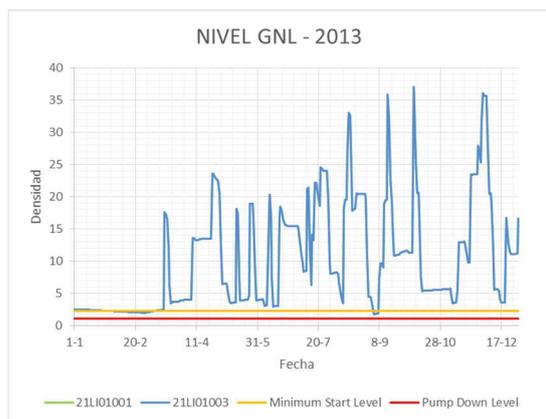


Figura 43. Nivel del tanque 2013

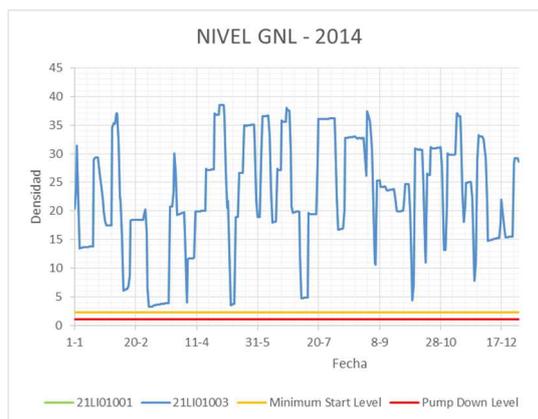


Figura 44. Nivel del tanque 2014

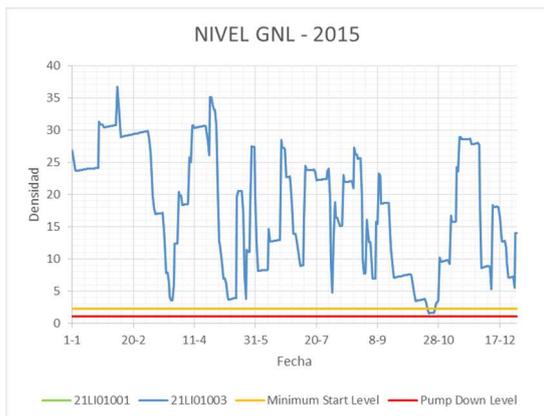


Figura 45. Nivel del tanque 2015

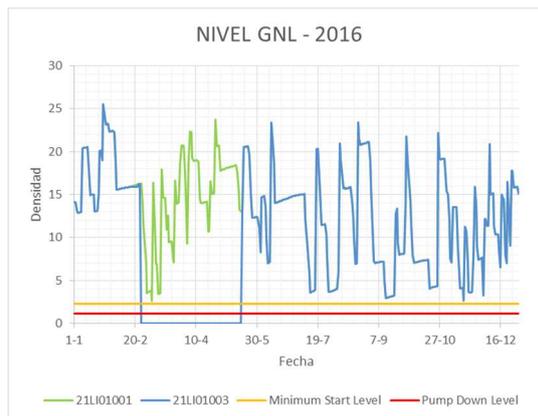


Figura 46. Nivel del tanque 2016

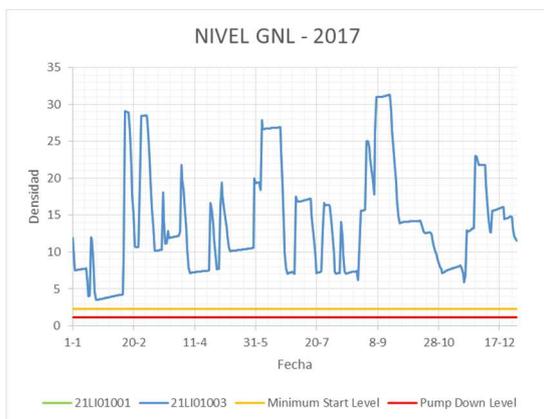


Figura 47. Nivel del tanque 2017

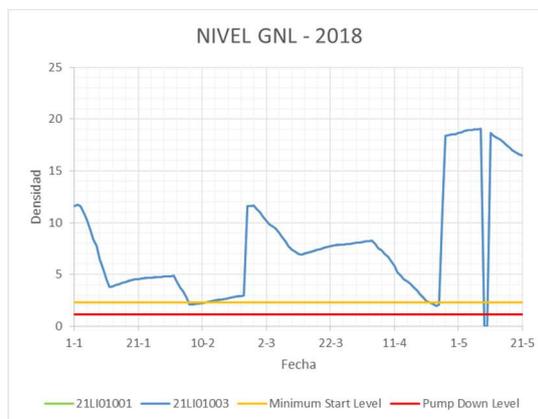


Figura 48. Nivel del tanque 2018

## HIPÓTESIS nº2. CAUDAL MÍNIMO DE RECIRCULACIÓN

La hipótesis número 2 pretende probar si la bomba trabajó en caudales de operación por debajo del mínimo permitido por el fabricante (150m<sup>3</sup>/h). Para desarrollar esta hipótesis se recurre a los valores de los caudales de impulsión de la bomba almacenados en el servidor de PI. Al no haberse ejecutado grandes mantenimientos sobre el equipo de bombeo, el estudio se circunscribe a los años de funcionamiento desde su puesta en marcha.

A continuación, en la figura 49, se muestra una tabla con los diferentes rangos de caudal a los que ha trabajado la bomba desde su instalación, año 2011, en el tanque 4 hasta el día de la avería 21 de mayo del 2018, además de un resumen de las horas que ha trabajado la bomba en cada uno de los rangos de caudal establecido y la proporción de horas para cada rango.

		BOMBA 21P04B										TOTAL	%	TOT. PD
TANQUE 4	Rango Caudal	Coficiente	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018				
	50-100 m <sup>3</sup> /h	19,53	0	0	0	0	0	0	0	0	1194	1195	16,51%	23333
	100-150 m <sup>3</sup> /h	19,53	0	0	0	0	0	1	0	63	138	203	2,80%	3959
	150-200 m <sup>3</sup> /h	19,53	1	1	91	13	49	3	126	69	353	353	4,89%	6903
	200-250 m <sup>3</sup> /h	5,44	1	5	109	18	89	36	88	11	357	357	4,94%	1945
	250-300 m <sup>3</sup> /h	2,44	0	2	87	68	77	63	93	0	391	391	5,40%	954
	300-350 m <sup>3</sup> /h	1,33	31	259	72	82	169	327	189	0	1129	1129	15,60%	1501
	350-400 m <sup>3</sup> /h	1,1	25	594	24	64	133	502	236	0	1578	1578	21,80%	1735
	400-450 m <sup>3</sup> /h	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%	0
450-500 m <sup>3</sup> /h	1,33	20	111	49	55	35	60	60	0	390	390	5,39%	519	
500-550 m <sup>3</sup> /h	5,44	2	34	462	808	290	23	21	0	1639	1639	22,66%	8919	
<b>TOTALES</b>											<b>7235</b>	<b>100%</b>	<b>49767</b>	

Figura 49. Datos de las horas de operación del equipo

Tal y como se puede observar en los datos tabulados, la bomba ha estado trabajando durante el 57% de las horas en rangos de caudal fuera (por debajo o por encima) del rango establecido como buena práctica para el equipo (rango de caudal entre 308 m<sup>3</sup>/h y 506 m<sup>3</sup>/h). También ha trabajado durante el 16,5% de las horas por debajo del caudal mínimo establecido por el fabricante (150 m<sup>3</sup>/h).

Si se centra el estudio en el año 2018, se puede observar que la bomba trabajó hasta un 90% de tiempo en caudales por debajo del mínimo admitido por el fabricante, tal y como se muestra en la figura 50.

HORAS DE FUNCIONAMIENTO	
Rango	Cantidad
50-100 m <sup>3</sup> /h	483
100-150 m <sup>3</sup> /h	63
150-200 m <sup>3</sup> /h	48
200-250 m <sup>3</sup> /h	2
250-300 m <sup>3</sup> /h	0
300-350 m <sup>3</sup> /h	0
350-400 m <sup>3</sup> /h	0
400-450 m <sup>3</sup> /h	0
450-500 m <sup>3</sup> /h	0
500-550 m <sup>3</sup> /h	0

Figura 50. Resumen horas de operación 2018

### HIPÓTESIS nº3. CALIDAD DEL GNL

La hipótesis número 3 pretende probar si la bomba trabajó con el fluido de proceso fuera de las especificaciones marcadas por el fabricante. Para desarrollar esta hipótesis se recurre a los valores de densidad del GNL de paso almacenados en el servidor de PI a partir de los valores obtenidos por el LTD de tanque. Al no haberse ejecutado grandes mantenimientos sobre el equipo de bombeo, el estudio se circunscribe a los años de funcionamiento desde su puesta en marcha.

En las siguientes figuras (figuras 51-58) se muestran las gráficas por año comparando la calidad de GNL con el que ha trabajado la bomba desde su instalación, año 2011, en el tanque 4 hasta el día de la avería 21 de mayo del 2018.



Figura 51. Densidad GNL 2011



Figura 52. Densidad GNL 2012

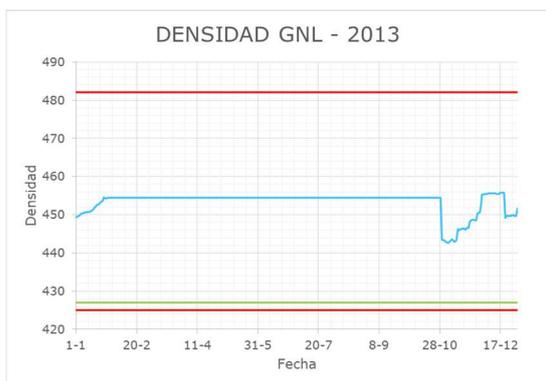


Figura 53. Densidad GNL 2013

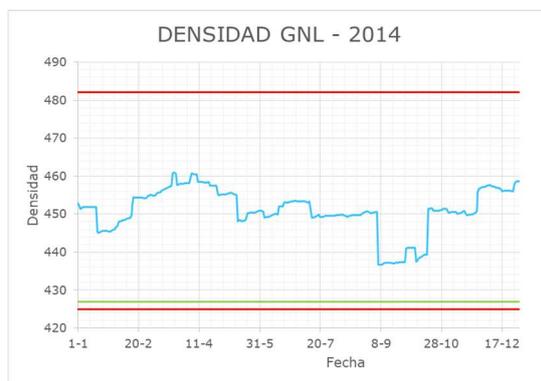


Figura 54. Densidad GNL 2014

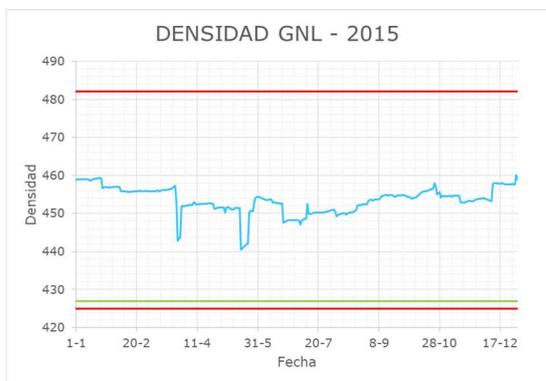


Figura 55. Densidad GNL 2015

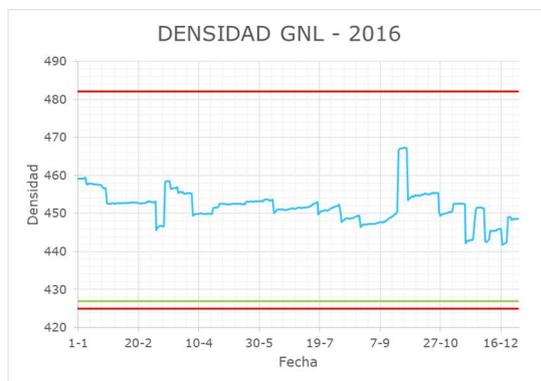


Figura 56. Densidad GNL 2016



Figura 57. Densidad GNL 2017

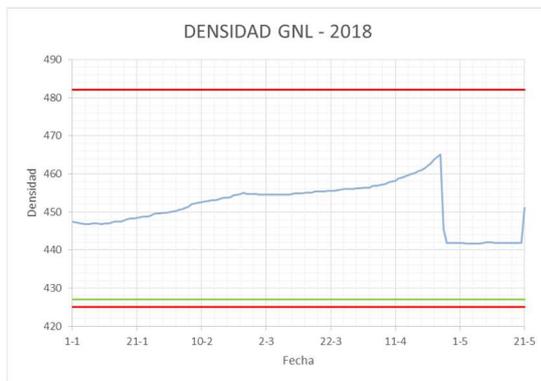


Figura 58. Densidad GNL 2018

Se puede concluir que la densidad siempre ha oscilado dentro de los límites establecidos como valor máximo y mínimo por el fabricante. Cabe destacar que entre el 28 de enero del 2013 y el 29 de octubre del 2013 no hay datos ya que el LTD estaba en mantenimiento.

#### HIPÓTESIS nº4. TEMPERATURA DE ASPIRACIÓN DEL EQUIPO

La hipótesis número 4 pretende probar si la bomba trabajó con el fluido de paso fuera de las especificaciones marcadas por el fabricante en lo que a temperaturas se refiere. Para desarrollar esta hipótesis se recurre a los valores de temperatura del GNL de paso almacenados en el servidor de PI a partir de los valores obtenidos por el LTD de tanque. Al no haberse ejecutado grandes mantenimientos sobre el equipo de bombeo, el estudio se circunscribe a los años de funcionamiento desde su puesta en marcha.

Los resultados obtenidos muestran que el equipo trabajó un 28% del total de horas con temperaturas de aspiración (y por lo tanto de impulsión) de fluido entre 0,1 y 2,9 °C por encima de la máxima permitida por el fabricante, lo cual pudo contribuir a un desgaste más acelerado de los componentes mecánicos del equipo.

#### HIPÓTESIS nº5 y 6. FLUCTUACIONES DEL CAUDAL DEBIDO A ERRORES DE MEDIDA Y AL FUNCIONAMIENTO DE LA FV

Las hipótesis número 5 y número 6 pretenden probar si las fluctuaciones de caudal que se vienen observando en la bomba en régimen estable de funcionamiento podrían estar relacionadas con problemas en los transmisores de caudal de impulsión (PT-290/291) o en la FV de recirculación del equipo (FV033).

Para probar la hipótesis, se recurre a los últimos certificados de calibración de los equipos, cuyos resultados se muestran en los documentos anexos a la memoria 3,4 Y 5. Tal y como se puede comprobar en los certificados de calibración anexos el resultado de la calibración para los transmisores (PT-290 PT-291) y la FV033 es favorable.

#### HIPÓTESIS nº7. FLUCTUACIONES DE CAUDAL DEBIDAS A VARIABLES DE PROCESO

La hipótesis número 7 pretende probar si las fluctuaciones de caudal que se vienen observando en la bomba en régimen estable de funcionamiento, y que podrían estar relacionados con el fallo acaecido, pueden tener su origen en otras variables de proceso que pudieran afectar al correcto funcionamiento del equipo, y que pudieran haber contribuido a un desgaste prematuro en los componentes mecánicos del mismo.

Pese a las investigaciones llevadas a cabo, no se encuentra ningún factor adicional a los ya analizados en las diferentes hipótesis que se desarrollan en el presente estudio (Temperatura, Nivel, Calidad del GNL, etc.).

#### HIPÓTESIS nº8. MODO DE FUNCIONAMIENTO DE LA FV EN AUTOMATICO O MANUAL

La hipótesis número 8 pretende probar, si durante la operación de la bomba, y trabajando la FV de recirculación en modo manual, se había operado de forma correcta ante variaciones en la solicitud de caudal de la bomba. Una operación errónea en este sentido

podría haber ocasionado un impacto sobre el equipo, que podría haber contribuido al fallo ocurrido.

Para desarrollar esta hipótesis se recurre a los valores de funcionamiento del equipo, almacenados en el servidor de PI. Se analizan los periodos de funcionamiento del equipo, contrastándolos con el modo de operación de la válvula de control de caudal (FV) (automático/manual), y analizando para los periodos de operación en modo manual, la respuesta de la misma ante variaciones de caudal.

Al no haberse ejecutado grandes mantenimientos sobre el equipo de bombeo, el estudio se circunscribe a los años de funcionamiento desde su puesta en marcha.

Del estudio de los datos se concluye que la válvula fue operada de forma correcta siempre que funcionó en modo manual, acompañando las variaciones de caudal con las aperturas y/o cierres necesarios por parte del personal de operaciones encargado de su manipulación.

#### HIPÓTESIS nº9. NÚMERO DE ARRANQUES

El equipo, hasta el momento del fallo, a las 6.910 horas de operación, presentaba un total de 223 arranques. Esta hipótesis pretende probar el efecto de este número elevado de maniobras de arranque, en las horas equivalentes de funcionamiento del equipo.

Se establece contacto con el fabricante del equipo, Nikkiso (por ser la bomba J.C Carter), para consultar e intentar establecer una relación de horas equivalentes por arranque. En base a la respuesta de NIKKISO-CARTER, se debe considerar 1 hora de funcionamiento equivalente por cada arranque de la bomba Carter modelo 60777, con número de serie A60777R3-47545-96-2. La respuesta del fabricante confirma que el número de arranques afecta al funcionamiento del equipo, al sumar una hora equivalente de funcionamiento por maniobra ejecutada (223 horas en el caso del equipo objeto del presente estudio).

Para el desarrollo de esta hipótesis, también se establece contacto con la empresa CCS (Compleat Cryogenic Services), especializada en reparación y mantenimiento de equipos rotativos como la bomba primaria objeto del estudio.

La respuesta de esta empresa a dicha consulta no cuantifica el efecto de los arranques sobre las horas equivalentes de funcionamiento del equipo, pero sí coincide con la del fabricante en señalar que tanto un número elevado de arranques, como el modo de funcionamiento por debajo de los caudales mínimos admitidos por el fabricante, afectan al número de horas de trabajo de estos equipos, y deben ser tenidos en cuenta a la hora de fijar los diferentes planes de mantenimientos basados en horas de operación.

Se adjunta extracto de la respuesta recibida por parte de CCS.

*“A pesar de ser una consulta recurrente no se ha hecho ningún estudio “serio” más allá de saber que tanto un numero de arranques elevado y trabajar con la bomba “lejos” del punto de eficiencia máximo son determinantes para establecer cuando una bomba debe de ser parada par mantenimiento.*

*Durante el arranque hay un transitorio (no mayor de un par de segundos) donde la presión en el "balance drum" no es suficiente para compensar el empuje axial. Durante ese tiempo el rodamiento es sometido a una deflexión importante causándole un desgaste de las pistas y bolas.*

*Por otro lado, también sabemos que operar la bomba en ratios bajos, alejado del punto de máxima eficiencia, también reduce la vida de la bomba. Esto se produce básicamente porque la estabilidad del rotor se reduce, y las partes rotativas pueden empezar a entrar en contacto con los bujes y/o aros produciendo un desgaste. Cualquier desgaste produce a su vez más inestabilidad creando aún más desgaste (un círculo vicioso...) por eso siempre recomendamos, en la medida de lo posible, una vez que se pone una bomba en mantenimiento corregir todas las holguras.*

*Operando la bomba a un ratio próximo al BEP la órbita del rotor es menor que las holguras de rotación, pero la estabilidad disminuye a medida que nos vamos alejando de este punto, especialmente a caudales bajos. En teoría y en situaciones ideales la estabilidad del rotor sería buena a partir del punto de caudal mínimo de operación determinado por el fabricante, pero operar la bomba próxima al BEP será la situación ideal.*

*Lo mejor en este tipo de situaciones es hacer análisis periódicos de vibración de la bomba, no solo la lectura que se obtiene en el DCS, sino un análisis en frecuencia. En ocasiones el desgaste de bujes y aros no es "fácil" de ver en un análisis de vibraciones, por lo que también recomendamos hacer un cálculo periódico de la curva de la bomba. La eficiencia de la boba debe estar "cerca" de la curva de fábrica en cualquier punto, de no ser así, lo más probable es que se esté perdiendo eficiencia debido al desgaste e incremento de las holguras".*

#### HIPÓTESIS nº10. HORAS DE OPERACIÓN

La hipótesis número 10 pretende probar si el número de horas de funcionamiento del equipo superó el límite establecido en los planes de mantenimiento fijados por la instalación.

En este sentido, cabe señalar que, para los equipos de bombeo primario de la instalación, el límite de horas de funcionamiento entre mantenimientos se sitúa en las 16.000 horas.

En el momento del fallo, el equipo contaba con 6.910 horas de operación según los valores de los horómetros asociados al equipo, y los valores de funcionamiento almacenados en el servidor de PI.

#### HIPÓTESIS nº11. ALTO NIVEL DE VIBRACIONES

La hipótesis número 11 pretende probar si el equipo funcionó sometido al efecto de vibraciones internas que pudieran llevar al fallo acaecido. Para la validación de la hipótesis se recurre al gestor de eventos monitorizado en continuo System1. Sensor 21VE04002B (figura 59).

El sistema muestra eventos de severidad 4 (alarma de segundo nivel) el 12 de mayo de 2018 a las 4:31 horas ( $> 7,1$  mm/s), que coinciden con una caída de presión en impulsión de bomba dos horas después. En la tendencia se observa que se mantiene por encima de este nivel durante unos minutos hasta que se pierde la señal de entrada (figura 60).

Date/Time	Severity	Category	Description	Path
12 May 2018 05:02:45.17	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 05:02:15.140	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:47:38.977	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:47:09.557	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:42:37.57	Severity 0	Management (sw) Alarm	LEFT: SW Over Alarm B	21-VE-04002B/Direct
12 May 2018 04:42:37.57	Severity 0	Management (sw) Alarm	LEFT: SW Over Alarm A	21-VE-04002B/Direct
12 May 2018 04:42:36.897	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:42:01.447	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:41:05.897	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:40:36.470	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:33:38.860	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:33:04.757	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:31:36.197	Severity 4	Management (sw) Alarm	ENTERED: SW Over Alarm B	21-VE-04002B/Direct
12 May 2018 04:30:40.853	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:30:11.140	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:18:57.40	Severity 0	Management (sw) Alarm	LEFT: SW Over Alarm A	21-VE-04002B/Direct
12 May 2018 04:18:56.860	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B
12 May 2018 04:18:27.70	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B

Figura 59. Lista de eventos de vibraciones

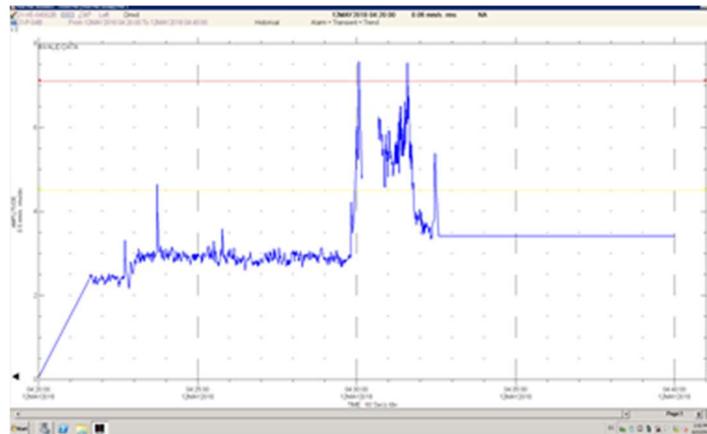


Figura 60. Caída de presión observada en el sistema de vibraciones

El 17 de mayo se vuelve a registrar otro evento de severidad 4, el cual se muestra en la figura 61. Cabe destacar que este análisis fue posterior a la avería. No se revisaron las alarmas registradas en System1 durante los días previos a la avería.

Date/Time	Severity	Category	Description	Path	Acknowledge Time	Acknowledge By	Initiator	Transient Reference
17 May 2018 13:41:27.483	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 13:09:22.657	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 13:07:57.680	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 13:03:50.847	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 13:03:20.987	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:50:33.093	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:49:51.533	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:40:29.647	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:40:08.517	Severity 0	System	LEFT: Not OK: Suppression	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:39:08.517	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:38:27.877	Severity 0	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:38:27.877	Severity 0	System	ENTERED: Not OK: Suppression	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:38:23.500	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:37:54.527	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:35:18.900	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:09:17.137	Severity 4	Management (sw) Alarm	ENTERED: SW Over Alarm B	21-VE-04002B/Direct	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:05:00.330	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:03:18.460	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 12:02:49.117	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:54:27.397	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:53:58.337	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:53:10.390	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:52:40.460	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:47:25.393	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:46:55.720	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:44:41.393	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:44:11.843	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:20:47.290	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:20:17.913	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:09:51.297	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 11:09:21.343	Severity 3	Instrumentation	ENTERED: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	
17 May 2018 10:59:42.210	Severity 0	Instrumentation	LEFT: Not OK	350042M Proximitor/Seismic Monitor21-VE-04002B	18 Jun 2018 08:05:52	SAGGA/system1 admin	No	

Figura 61. Evento de severidad 4 registrado el 17 de mayo

## HIPÓTESIS nº12. ERRORES DE MEDIDA

La hipótesis número 12 pretende probar el fallo producido en la bomba es debido a errores de medida en los instrumentos de medición del caudal de la bomba y del nivel del tanque. Con los anexos 3 y 4 se verifica que los instrumentos utilizados para la medición del caudal y del nivel del tanque están calibrados correctamente.

### HIPÓTESIS nº13. ALARMAS Y DISPAROS

La hipótesis número 13 pretende probar si la configuración de alarmas y disparos asociados a la operativa del equipo estaban configurados de forma correcta, y por lo tanto cumplieron su función de protección.

El estudio efectuado concluye que las alarmas y enclavamientos implementadas en el sistema integrado de seguridad (SIS) se corresponden con los valores teóricos definidos en la documentación del proyecto tal y como se muestra en la figura 62.

<b>Alarma/Enclavamiento</b>	<b>Teórico (Según doc. Proyecto)</b>	<b>Real implementado</b>
<b>21PAHH04019B Muy Alta presión N<sub>2</sub> conduit elec.</b>	0,7 bar	0,7 bar
<b>21PAHH04020B Muy Alta presión N<sub>2</sub> conduit inst.</b>	0,7 bar	0,7 bar
<b>21TALL04031B Muy Baja presión N<sub>2</sub> conduit elec.</b>	-20°C	-20°C
<b>21TALL04032B Muy Baja presión N<sub>2</sub> conduit inst.</b>	-20°C	-20°C
<b>21FALL04005B Muy bajo caudal recirculación</b>	150 m <sup>3</sup> /h	150 m <sup>3</sup> /h

Figura 62. Comparación de los valores de los enclavamientos

### HIPÓTESIS nº14. SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES

La hipótesis número 14 pretende probar si el sistema de monitoreo de las vibraciones instalado en el equipo está funcionando correctamente. Se observa que no se está llevando un plan de revisión periódica y análisis del sistema de vibraciones System One de Bentley Nevada, para comprobar la no existencia de eventos en los equipos incluidos en el sistema.

### HIPÓTESIS nº15, 16, 17, 19, 20, 21, 22 y 23. MATERIALES, AJUSTES Y TOLERANCIAS

Las siguientes hipótesis pretenden probar que, en la fabricación, montaje, entrega en la instalación, y puesta en servicio del equipo, no hubo errores o defectos que pudieran ocasionar el fallo acaecido.

Ya desde un inicio, se pueden descartar estas hipótesis, pues si hubieran existido estos problemas, se habrían manifestado en las primeras horas de operación del equipo, y no a las 6.910 horas de operación, como así ocurrió. No obstante, y puesto que no se han efectuado grandes mantenimientos sobre la bomba, es necesario recurrir a la documentación del proyecto para validar y/o descartar la hipótesis.

Se comprobaron los siguientes documentos, localizados en los anexos del proyecto:

- Certificado de conformidad bomba primaria S/N 149, según el cual, tanto la fabricación como la inspección y pruebas de la bomba reúnen todos los requerimientos contractuales y especificaciones aplicables. Aunque este certificado corresponde a la 21P04A, esta es la bomba que estaba introducida en la columna 21P04B en el momento de la avería.
- Autorización de envío, donde se indica que todas las verificaciones de ingeniería, fabricación y pruebas han sido satisfactorias.
- Informe de puesta en marcha y pruebas de garantía con aceptación de UTE y EDPS

**HIPÓTESIS nº18. PLATO DIFUSOR Y RODAMIENTO DE ASPIRACIÓN**

La hipótesis pretende número 18 probar si hubo algún error en el diseño de los elementos por parte del fabricante.

No se establece nueva comunicación con el fabricante, pues en la visita efectuada por Nikkiso a la instalación meses después del fallo ocurrido, se efectuó un análisis riguroso sobre ambos componentes, concluyendo que el diseño de los mismos es conforme a las especificaciones requeridas.

**7.6.3.3. Validación de hipótesis**

Una vez analizadas y desarrolladas todas las hipótesis que se habían planteado al inicio del análisis, estas tienen que ser validadas. Para ello, se tienen que identificar que hipótesis pueden haber sido las causantes del fallo y cuáles no. En la figura 63 se muestra la tabla de validación de las hipótesis.

Definición del problema ¿qué es lo que ocurrió?	Definición de los modos de fallo ¿cómo puede ocurrir?	Validación de hipótesis		
		Hipótesis	Validación	Motivo
La bomba 21-p-048 no da caudal ante una solicitud por subida de producción	Factores Operacionales	Nivel del tanque	DESCARTADA	Se comprueba que los niveles del tanque no descendieron de los mínimos admisibles mientras la bomba estaba en funcionamiento.
		Caudal mínimo de recirculación	VALIDADA	Se comprueba que la bomba ha estado trabajando por debajo y por encima del rango establecido como buena práctica por el fabricante, sobretodo durante el año 2018.
		Calidad del GNL	DESCARTADA	Se comprueba que la densidad del GNL siempre se ha situado dentro de los límites para los que se ha diseñado el equipo.
		Temperatura de aspiración e impulsión	VALIDADA	Se comprueba que el equipo ha estado trabajando con temperaturas superiores a las recomendadas por el fabricante.
		Fluctuaciones de caudal y error de medida en el caudal de paso	DESCARTADA	Se verifica que los equipos de medición están calibrados.
		Fluctuaciones de caudal debidas al mal funcionamiento de la FV	DESCARTADA	Se verifica que la válvula FV está calibrada.
		Fluctuaciones de caudal debido a variables de proceso	DESCARTADA	No se encuentra ninguna variable de proceso más que pueda influir en el funcionamiento del equipo a parte de los ya estudiados.
		Modo de funcionamiento de la FV en automático o manual	DESCARTADA	Se comprueba que la válvula fuera operada correctamente siempre que operó en modo manual.
		Número de arranques	VALIDADA	Se analiza con el fabricante de la bomba y con otro fabricante de equipos similares, y se afirma que el número de arranques puede ser una causa de fallo del equipo puesto que aumenta el número de horas de funcionamiento del mismo.
		Horas de funcionamiento del equipo	DESCARTADA	Las horas que lleva en funcionamiento bomba son menores a las que recomienda el fabricante para realizar el primer mantenimiento.
	Problemas de instrumentación	Alto nivel de vibraciones	DESCARTADA	Se comprueba las alarmas producidas por vibraciones y solo se encuentran dos eventos de severidad 4 días anteriores al fallo.
		Errores de medida	DESCARTADA	Se verifica que los instrumentos de medición de los parámetros que controlan el equipo están calibrados.
		Alarmas/Disparos	DESCARTADA	Se comprueba que las alarmas y enclavamientos se corresponden con los valores teóricos establecidos por el fabricante.
	Problemas eléctricos	Sistema de monitoreo de vibraciones	VALIDADA	Se observa que no se está llevando un control de sistema de monitoreo de las vibraciones del equipo.
		Suministro de red, protección eléctrica e inversión de fases	DESCARTADA	Se comprueba que en la fabricación, montaje, entrega en la instalación, y puesta en servicio del equipo, no hubo errores o defectos que pudieran ocasionar el fallo.
	Diseño y fabricación	Materiales	DESCARTADA	Se comprueba que en la fabricación, montaje, entrega en la instalación, y puesta en servicio del equipo, no hubo errores o defectos que pudieran ocasionar el fallo.
		Ajustes	DESCARTADA	Se comprueba que en la fabricación, montaje, entrega en la instalación, y puesta en servicio del equipo, no hubo errores o defectos que pudieran ocasionar el fallo.
		Plato difusor y rodamiento de aspiración	DESCARTADA	El fabricante del equipo visita la planta y concluye que el diseño del plato difusor y del rodamiento de aspiración del equipo es conforme a las especificaciones requeridas.
	Montaje	No se sigue procedimiento	DESCARTADA	Se comprueba que en la fabricación, montaje, entrega en la instalación, y puesta en servicio del equipo, no hubo errores o defectos que pudieran ocasionar el fallo.
		No se siguen ajustes y tolerancias		
Instalación en campo	No se sigue procedimiento	DESCARTADA	Se comprueba que en la fabricación, montaje, entrega en la instalación, y puesta en servicio del equipo, no hubo errores o defectos que pudieran ocasionar el fallo.	
	Fallo en cableado o soporte eléctrico			
	Apertura de la válvula de pie			

Figura 63. Tabla de validación de hipótesis

En la figura 64 se presenta el árbol lógico creado a partir del análisis causas raíz con las hipótesis y modos de fallo que se han descartado, y las hipótesis y modos de fallo que se han validado como causas del fallo.

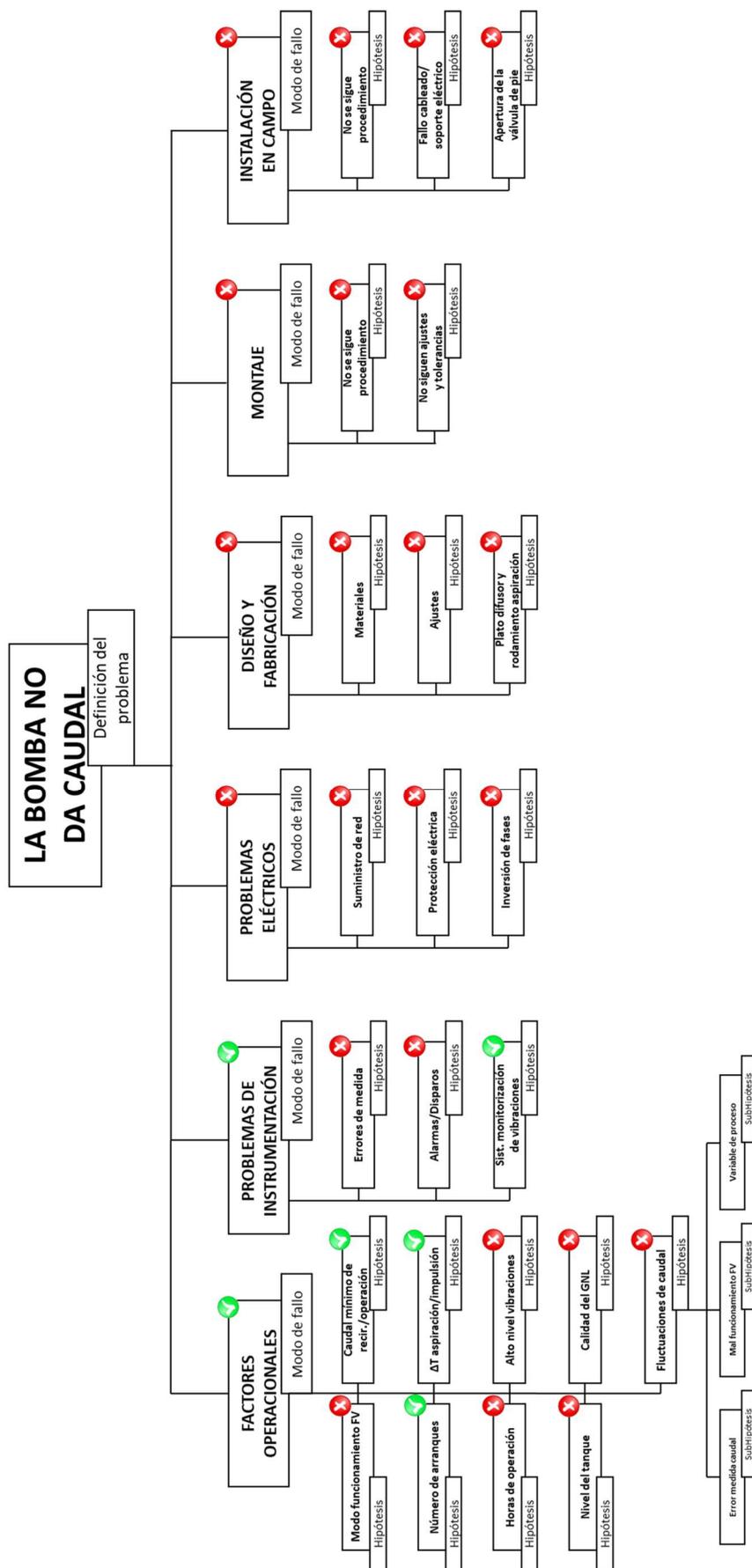


Figura 64. Árbol lógico con hipótesis validadas

### 7.6.4. DEFINICIÓN Y VALIDACIÓN DE CAUSAS RAICES

Para concluir la etapa de análisis de determinación de las causas del fallo, las hipótesis validadas en el apartado anterior se establecen como causas raíces del problema y se clasifican según sean causa raíz física, latente o humana.

Tal y como se ha definido anteriormente, las causas raíces físicas son aquellas que envuelven materiales o cosas tangibles, por tanto, en el caso de la bomba primaria y dado el problema descrito en este proyecto las raíces físicas son:

- **Factores operacionales**
  - La bomba opera con una temperatura de aspiración superior a la máxima permitida por el fabricante
  - Elevado número de arranques
  - La bomba opera por debajo del caudal mínimo permitido por el fabricante

Las raíces humanas son aquellas que vienen dadas generalmente por una acción incorrecta por parte de un trabajador o un grupo de trabajador. En este caso, ninguna de las hipótesis validadas es una causa provocada por un fallo humano.

Las raíces latentes son producto de deficiencias en los procesos de trabajo o administrativos. Al realizar este análisis se detecta que el fallo podría haber sido evitado si el sistema de monitorización de vibraciones hubiera funcionado correctamente y se hicieran revisiones de este, además no se había en cuenta que al trabajar el equipo en rangos de caudales inferiores o superiores a los recomendados por el fabricante se tendrían que haber modificado el intervalo de tiempo entre mantenimiento. Por lo tanto, se identifican dos causas latentes:

- **Factores operacionales**

Los procedimientos de mantenimiento basados en horas que hay establecidos en la planta no tienen en cuenta el rango de caudales de operación del equipo.
- **Problemas de instrumentación**

Existencia de incertidumbre en el sistema de monitoreo de las vibraciones del equipo.

La figura 65 presenta el árbol lógico con las hipótesis validadas y clasificadas según el tipo de causa raíz al que pertenecen.

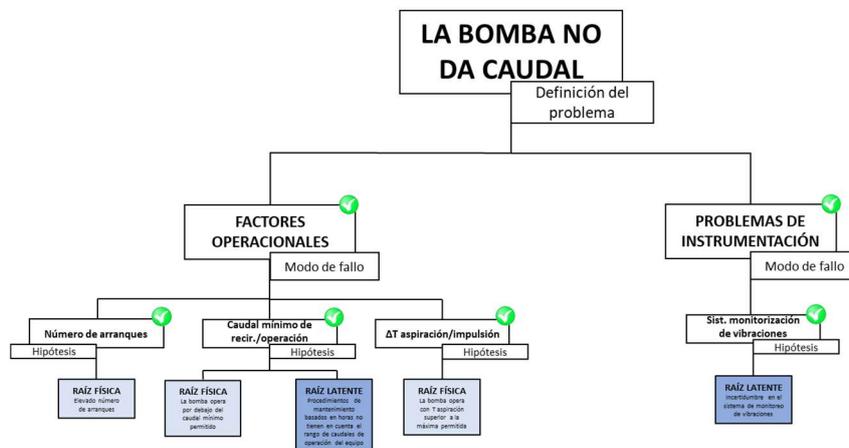


Figura 65. Causas raíces del problema

Cada una de las causas raíces nombradas anteriormente tiene que ser analizada. En la figura 66 se define el procedimiento de análisis de cada una de las causas raíces establecidas.

Análisis de Causas Raíces	
Causas	Procedimiento de análisis
<b>Causa Raíz Física:</b> La bomba opera por debajo del mínimo caudal admisible según la hoja de datos del fabricante	Obtención de los caudales de operación de la bomba a través de PI y contratación contra los valores de referencia del fabricante
<b>Causa Raíz Física:</b> La bomba opera con fluido fuera de especificación al superar la temperatura de aspiración permitida según la hoja del fabricante	Obtención de las temperaturas de aspiración/impulsión de la bomba a través de PI y contrastación contra valores de referencia del fabricante
<b>Causa Raíz Física:</b> Elevado número de arranques en el equipo	Obtención del número de arranques del equipo desde su puesta en marcha y consulta al fabricante del efecto de estos arranques en las horas equivalentes de funcionamiento del equipo
<b>Causa Raíz Latente:</b> Los procedimientos de mantenimiento de equipos de bombeo primario por horas no tienen en cuenta el rango de operación del equipo	Análisis de los procedimientos de mantenimiento de equipos de bombeo primario
<b>Causa Raíz Latente:</b> Incertidumbre en las medidas generadas por el sistema de monitorización de vibraciones en estos equipos	Se comprueba la fecha de ejecución de los mantenimientos mensuales de vibraciones, los valores de vibraciones obtenidos en dichos mantenimientos, y las actuaciones derivadas de dichos mantenimientos

Figura 66. Procedimientos de análisis causas raíces

#### 7.6.4.1. Causa Raíz Física 1

La causa raíz física nº 1 hace referencia al hecho de que la bomba ha estado operando por debajo del mínimo caudal admisible según la hoja de datos del fabricante.

Tal y como se ha demostrado en la hipótesis nº 2 la bomba desde su puesta en marcha ha estado trabajando por debajo de su rango óptimo de operación equipo (rango de caudal entre 308 m<sup>3</sup>/h y 506 m<sup>3</sup>/h), e incluso por debajo del valor permitido por el fabricante (150 m<sup>3</sup>/h).

Si se compara este régimen de funcionamiento con la curva de la bomba según fabricante (Anexo nº 2) y la hoja de características del equipo (Anexo nº 1), se puede concluir que la bomba trabaje entre esos rangos afecta al rendimiento y eficiencia de trabajo del equipo.

#### 7.6.4.2. Causa Raíz Física 2

La causa raíz física nº 2 hace referencia al hecho de que la bomba ha estado operando con el fluido fuera de especificación al superar la temperatura de aspiración permitida según la hoja del fabricante (Anexo nº1).

Pese a quedar demostrado en la validación de la hipótesis 4 que la bomba operó con temperaturas de fluido superiores a la máxima permitida por el fabricante, el equipo de trabajo decide no poner en marcha ninguna acción correctora destinada a evitar la repetición del suceso.

Los valores de alta temperatura en el fluido de paso se corresponden con una situación excepcional con respecto a la operativa normal de la instalación, pues se alcanzaron como resultado de un periodo de tiempo elevado sin regasificación, y, por lo tanto, sin descargas de GNL en el tanque donde se ubica la bomba de estudio.

Esta situación provocó un recalentamiento del líquido restante en el tanque, por lo que, al arrancar la bomba, esta funcionó por encima de los límites admisibles.

Desde el área de operaciones, se confirma que, de volverse a dar la situación, primaria el servicio de regasificación sobre las condiciones de operación del equipo, por lo que se decide no aplicar medidas correctoras.

#### 7.6.4.3. Causa Raíz Física 3

La causa raíz física nº 3 hace referencia al hecho de que la bomba ha arrancado un número elevado de veces desde su puesta en marcha.

Pese a quedar demostrado en la validación de la hipótesis 9 que la bomba incurrió en un número elevado de arranques, y que estos tienen un efecto sobre el número de horas equivalentes de trabajo, el equipo decide no poner en marcha ninguna acción correctora destinada a evitar la repetición del suceso.

Se entiende que el peso de esta hipótesis sobre el problema ocurrido es mínimo en base a la respuesta de Nikkiso, que cuantifica en 1 heq/arranque el efecto de cada maniobra en el equipo.

#### 7.6.4.4. Causa Raíz Latente 1

La causa raíz latente nº 1 hace referencia al hecho de que los procedimientos de mantenimiento de los equipos de bombeo primario no tienen en cuanto el rango de operación del equipo.

Tal y como se ha demostrado en la hipótesis nº 2 la bomba desde su puesta en marcha ha estado trabajando por debajo de su rango óptimo de operación equipo (rango de caudal entre 308 m<sup>3</sup>/h y 506 m<sup>3</sup>/h), e incluso por debajo del valor permitido por el fabricante (150 m<sup>3</sup>/h).

Dado que todas las bombas de la planta están trabajando durante determinado intervalo tiempo en rangos de caudal fuera del permitido se analizan los diferentes rangos de caudal en los que han trabajado todas las bombas instaladas en los tanques desde el último mantenimiento de 16000 horas.

Con ello se pretende modificar el tiempo entre revisiones de mantenimiento de cada una de las bombas ajustando estas horas según los rangos de caudal a los que ha trabajado la bomba en ese intervalo de tiempo ya que la vida útil de un equipo puede reducirse en gran medida cuando está trabajando en zonas no adecuadas.

A continuación, se muestran las gráficas por año con los valores de caudal de operación del equipo, comparando dicha variable con la campana de distribución de caudal del equipo (figuras 67-75).

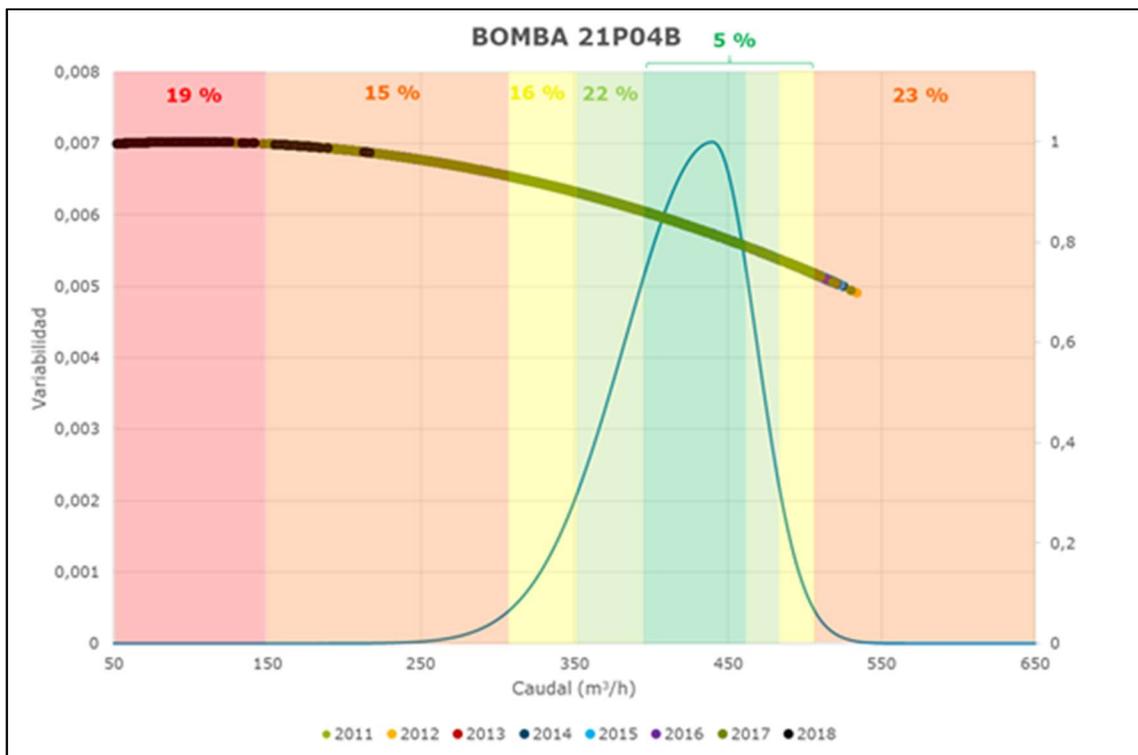


Figura 67. Evolución del caudal de operación

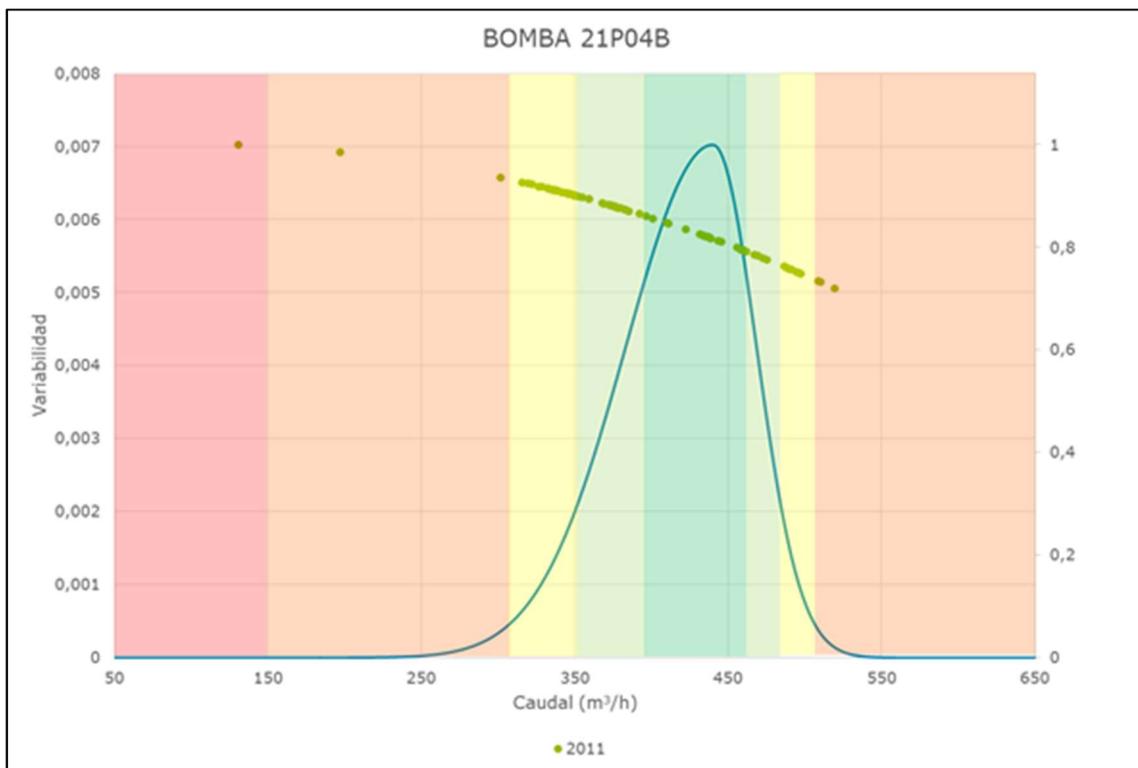


Figura 68. Caudal de operación del equipo durante el año 2011

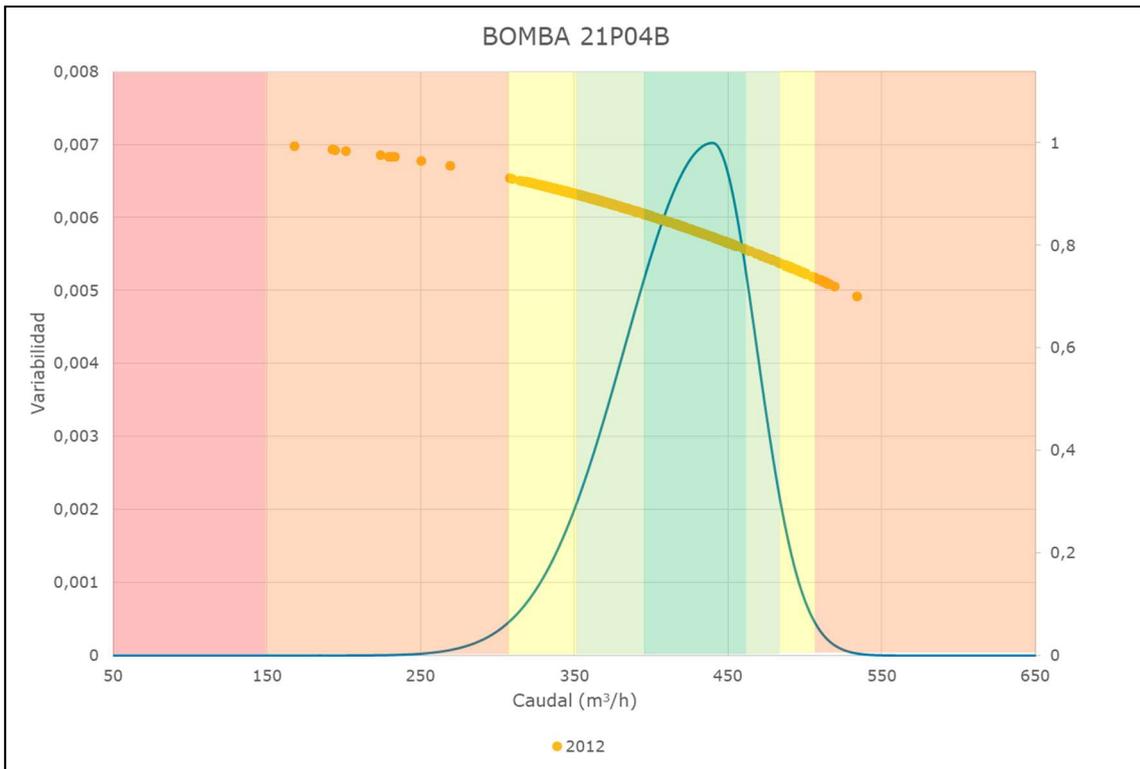


Figura 69. Caudal de operación del equipo durante el año 2012

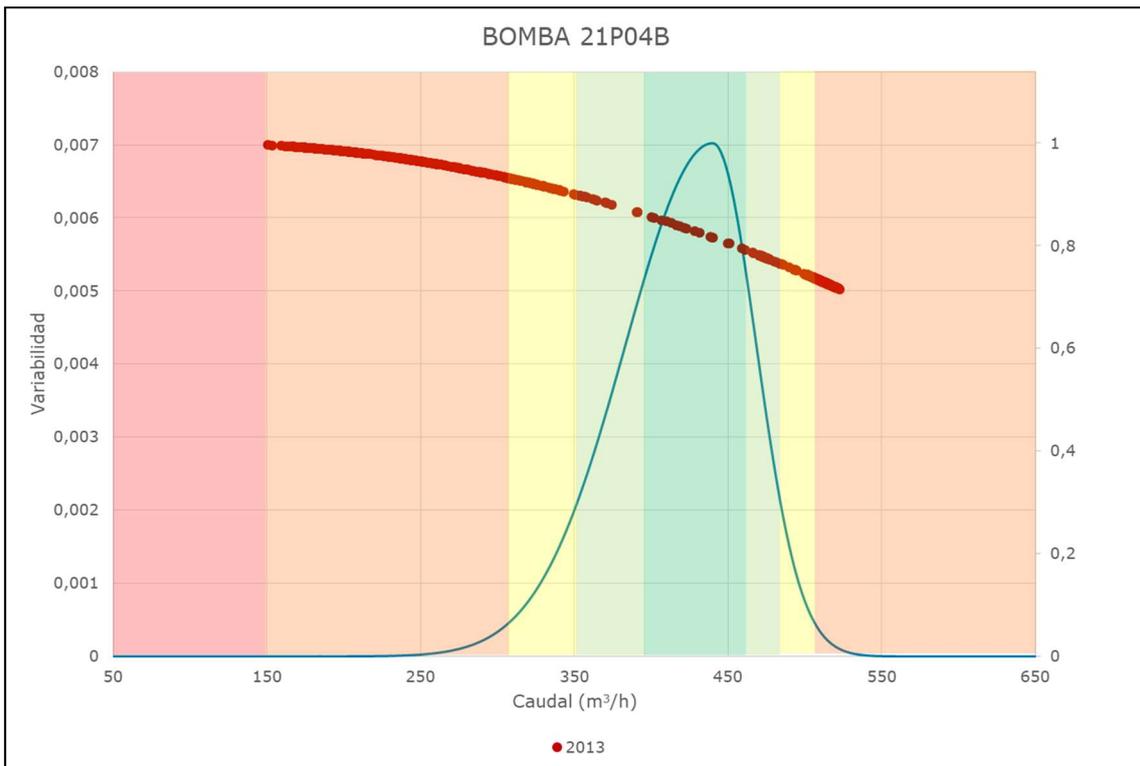


Figura 70. Caudal de operación del equipo durante el año 2013

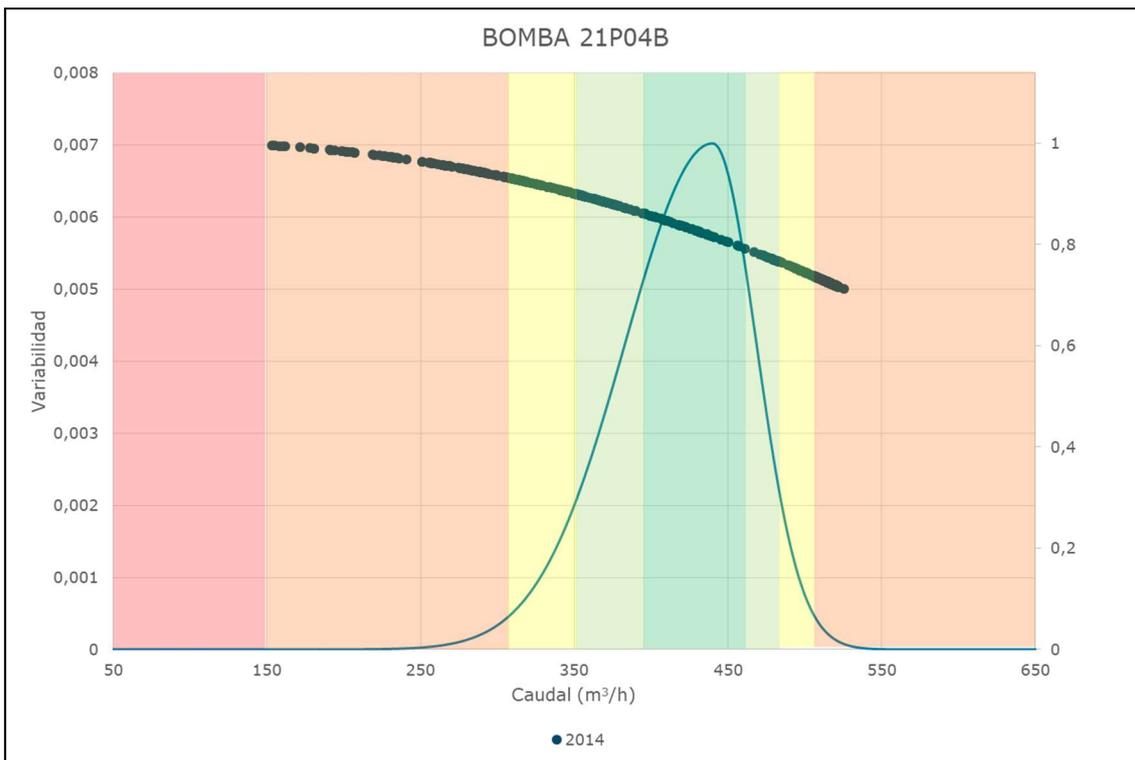


Figura 71. Caudal de operación del equipo durante el año 2014

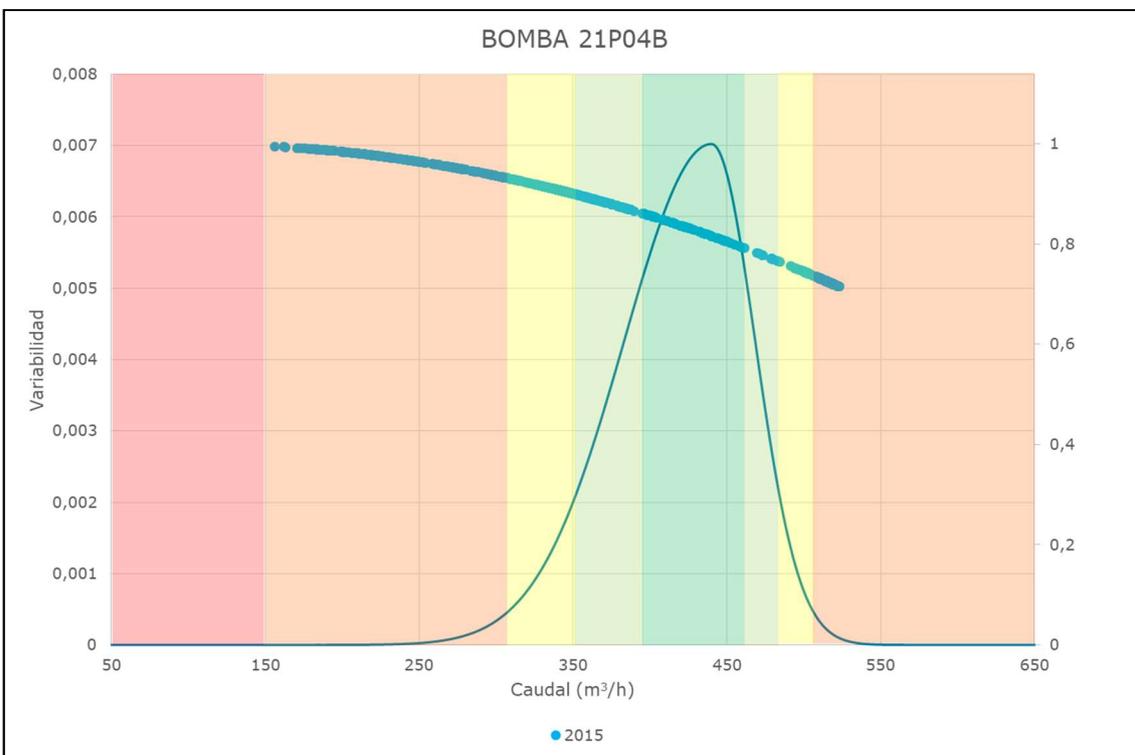


Figura 72. Caudal de operación del equipo durante el año 2015

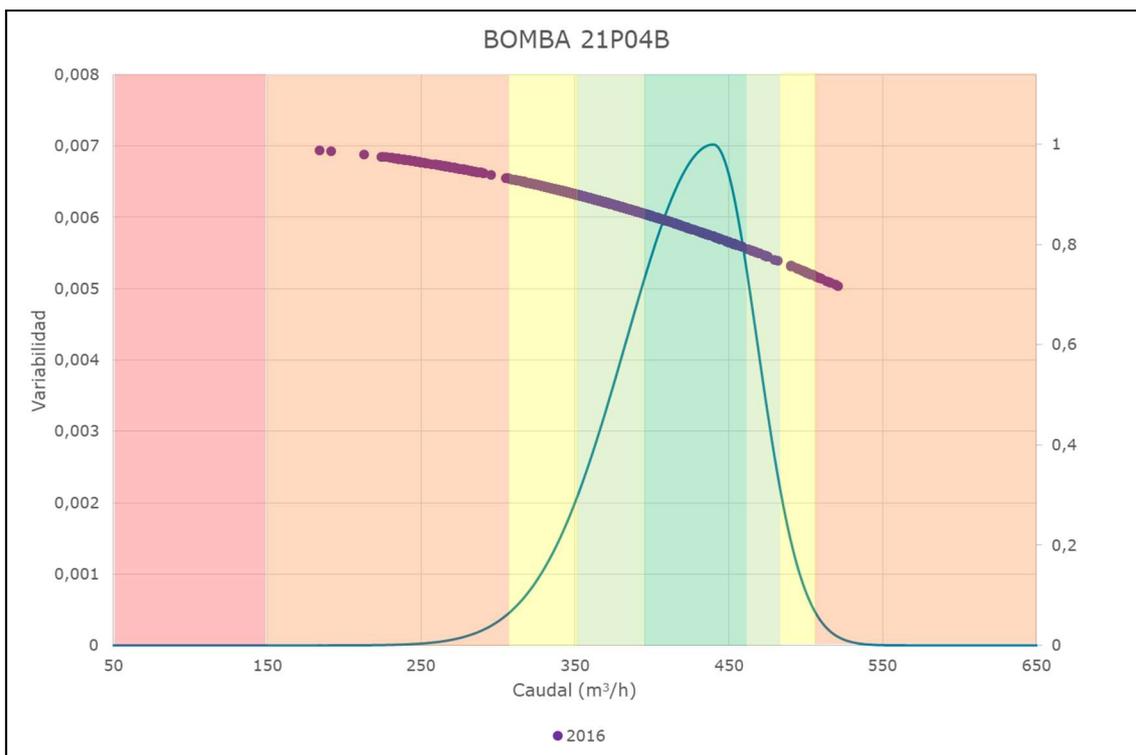


Figura 73. Caudal de operación del equipo durante el año 2016

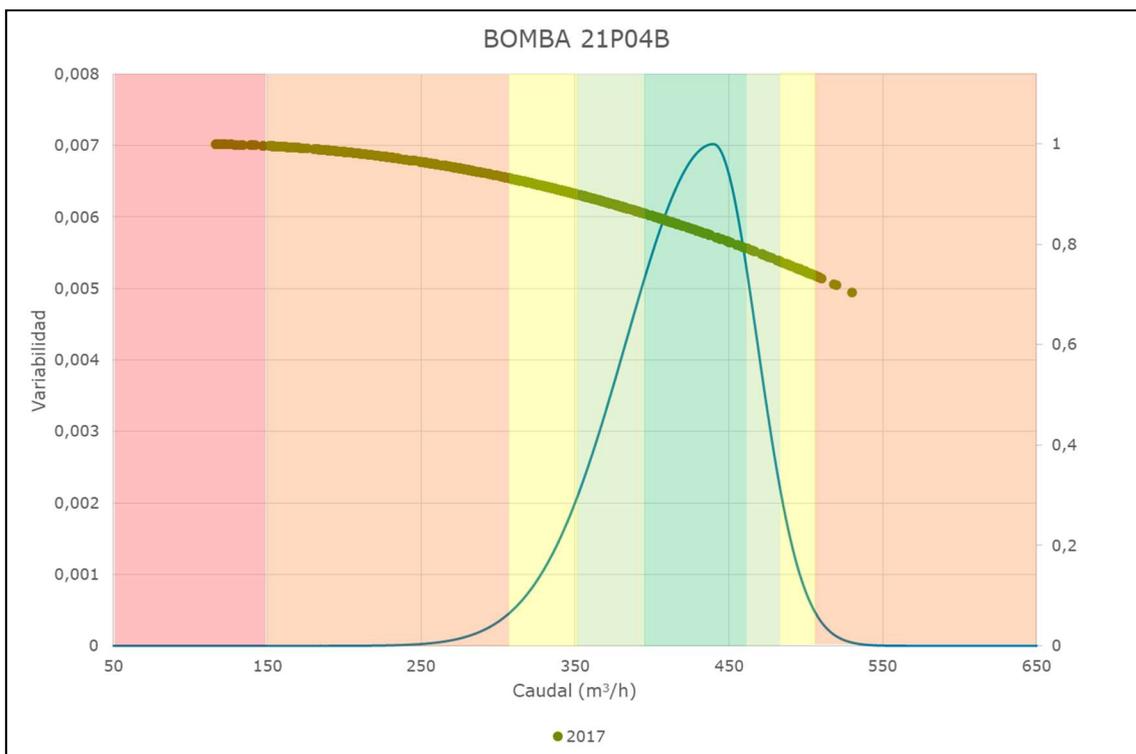


Figura 74. Caudal de operación del equipo durante el año 2017

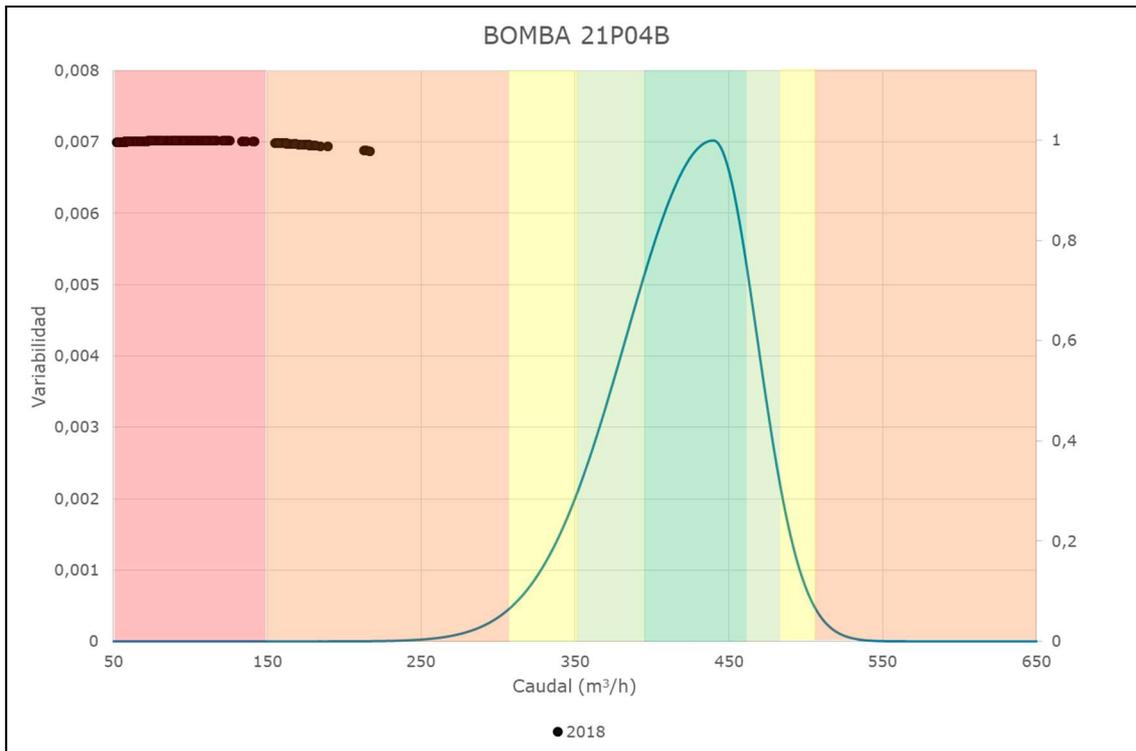


Figura 75. Caudal de operación del equipo durante el año 2018

Tal y como se puede observar en las figuras anteriores, el equipo ha estado trabajando durante largos periodos de tiempo con rangos de caudal que están fuera de la zona óptima de trabajo de la campana. Por tanto, trabajar en rangos de caudal no recomendados implica la necesidad de reducir el tiempo entre mantenimientos, aspecto que no se había considerado.

#### 7.6.4.5. Causa Raíz Latente 2

La causa raíz latente nº 2 hace referencia a la incertidumbre en las medidas generadas por el sistema de monitorización de vibraciones en estos equipos.

Si bien la hipótesis no se valida como causa raíz del fallo, sí que se considera la activación de un plan de revisión periódica y análisis del sistema de vibraciones System One de Bentley Nevada, para comprobar la no existencia de eventos en los equipos incluidos en el sistema.

### 7.7. IMPLANTACIÓN DE SOLUCIONES

#### 7.7.1. SELECCIÓN DE LAS ACCIONES CORRECTIVAS

La causa del problema cuyo síntoma fue que la bomba 21P04B no alcanzó la presión suficiente ante una solicitud del aumento del caudal por subida de la producción se descubre tras la aplicación del árbol lógico del análisis causa raíz. La principal causa de este fallo fue que la bomba estuvo trabajando durante grandes intervalos de tiempo en rangos de caudal no recomendados para el equipo, sin tener en cuenta que este hecho reduce la vida del equipo y por tanto se tiene que disminuir el intervalo de tiempo entre mantenimientos.

Como recomendación de mejora, las soluciones que se proponen al final de la aplicación del árbol lógico son las que se describen a continuación. Estas acciones correctivas se describen añadiendo datos como el responsable de implantación y la causa raíz con la que están relacionadas.

- **ACCIÓN CORRECTIVA nº 1**

Se modifica el modo de operación de la bomba para que esta no trabaje por debajo del caudal mínimo admisible por el fabricante. De esta manera, se elimina la causa raíz física 1 establecida por la metodología desarrollada. El encargado del desarrollo de esta acción correctiva es el responsable del departamento de operaciones.

- **ACCIÓN CORRECTIVA nº 2**

Se aumenta el caudal mínimo de recirculación a 200 m<sup>3</sup>/h puesto que antes del fallo estaba establecido en 150 m<sup>3</sup>/h y se ha comprobado que si la bomba trabaja durante un largo periodo de tiempo a ese caudal se reduce en gran medida su vida útil. Esta acción es para eliminar la misma causa raíz que la acción descrita en primer lugar (causa raíz 1). Como la anterior acción, esta es el responsable de operaciones el encargado de llevarla a cabo.

- **ACCIÓN CORRECTIVA nº 3**

El departamento de mantenimiento podrá en marcha estudios sobre el efecto de los rangos de operación en equipos similar a este, para a partir de la experiencia recabada poder adaptar los planes de mantenimiento basados en horas reales de operación, de forma que estos tengan en cuenta los periodos de tiempo en que el equipo opera fuera de los rangos de caudal recomendados. Para ello, se ha generado, mediante un archivo Excel, una tabla para cada una de las bombas primarias en la cual se establecen las horas de operación de los equipos en cada uno de los rangos y se ponderan las horas totales de operación dependiendo del caudal de trabajo del equipo. Con ello, se pretende conocer las horas equivalentes de operación de cada uno de los equipos de bombeo primario de la planta así poder modificar el tiempo entre mantenimientos. Esta acción correctiva permite eliminar la causa raíz latente 1, que hace referencia a que los planes de mantenimiento no tienen en cuenta el rango de operación del equipo.

- **ACCIÓN CORRECTIVA nº 4**

El departamento de mantenimiento activará un plan de revisión periódica y análisis del sistema de vibraciones System One de Bentley Nevada, de forma que se compruebe mensualmente que no existe evento en los equipos pertenecientes al bombeo primario. Los encargados de realizar esta tarea serán los operadores mecánicos a los cuales se les ha creado un plan con frecuencia mensual. Esta acción correctiva permite eliminar la causa raíz latente 2.

Con las acciones correctoras propuestas no se eliminan todas las causas raíces que ha vertido el árbol lógico tras la realización del análisis causa raíz. Para la raíz física que hace referencia a que la temperatura del fluido de aspiración es mayor a la permitida (causa raíz física

2), se decide no poner en marcha ninguna acción correctora ya que se entiende que, aunque se den condiciones de temperatura por encima de los límites permitidos, tiene mayor peso la prestación del servicio de regasificación. No obstante, se recomienda reanalizar dicha causa a futuro para buscar medidas que eviten la repetitividad de este evento.

Otra de las causas para la cual no se ha puesto en marcha ninguna acción correctiva es para el elevado número de arranques del equipo (causa raíz física 3). Se decide no poner en marcha ninguna acción correctiva al entender que el peso de esta causa raíz en el problema acaecido es mínimo en base a la respuesta del fabricante del equipo. Se recomienda reanalizar la causa a futuro para buscar medidas que eviten la repetitividad de este evento.

### 7.7.2. IMPLANTACIÓN DE LAS ACCIONES CORRECTIVAS

En el momento actual, todavía no se han obtenido datos de cómo de efectivas han sido las soluciones propuestas en particular, ya que no ha pasado el suficiente tiempo desde su implantación para observar resultados. Además, para algunas de las mejoras implantadas, es difícil observar su resultado ya que simplemente se han modificados los parámetros de operación del equipo.

En la figura 68, se observa todas las medidas adoptadas relacionadas con la causa raíz, el responsable de su ejecución y el periodo de tiempo y fecha de inicio. Ninguna de las acciones correctivas implementadas tiene coste sujeto puesto que todas ellas se pueden llevar a cabo con recursos ya existentes en la planta de regasificación (SAGGAS).

Análisis de Acciones Correctivas					
Causas	Acción correctiva	Responsable	Fecha inicio	Duración	Resultados
<b>Causa Raíz Física:</b> La bomba opera por debajo del mínimo caudal admisible según la hoja de datos del fabricante	Se modifica el modo de operación de la bomba para no trabajar por debajo del mínimo caudal admisible	Jefe de operaciones	may-19	Indefinida	No se han observado resultados particulares de cada una de las acciones implementadas. En general, estas acciones llevadas a cabo han permitido sacar una bomba primaria debido a los eventos de vibraciones encontrados en el sistema y ajustar los planes de mantenimiento de todas las bombas adaptando así el intervalo de tiempo entre mantenimientos a cada equipo. Durante el año 2020 se prevee extraer dos bombas para ver el resultado de las acciones implantadas
	Se incrementa el caudal mínimo de recirculación a 200 m <sup>3</sup> /h	Jefe de operaciones	may-19	Indefinida	
<b>Causa Raíz Latente:</b> Los procedimientos de mantenimiento de equipos de bombeo primario por horas no tienen en cuenta el <u>rango de operación del equipo</u>	La instalación pone en marcha estudios sobre el efecto de los rangos de operación en equipos similares para poder adaptar los planes de mantenimiento basados en horas	Departamento de mantenimiento	oct-19	Indefinida	
<b>Causa Raíz Latente:</b> Incertidumbre en las medidas generadas por el sistema de monitorización de vibraciones en estos equipos	Activación de un plan de revisión periódica y análisis del sistema de monitorización de vibraciones	Departamento de mantenimiento	ene-20	Indefinida	

Figura 76. Análisis de las acciones correctivas

### 7.7.3. LECCIONES APRENDIDAS

Las condiciones de baja producción de la planta en los últimos años, en muchas ocasiones por debajo del mínimo técnico, e incluso con paradas totales y prolongadas de la instalación, junto con el modo de operación de la bomba fuera del régimen preferido e incluso por debajo del mínimo permitido según datos de diseño, han contribuido a que la bomba 21-P-04-B, haya sufrido un desgaste acelerado de sus componentes, llevando al fallo catastrófico de la misma con tan solo 6.910 horas de operación.

Esta es una realidad asumida, para ser eficientes energéticamente y evitar quemar gas por la antorcha, por tanto, las condiciones de trabajo de los equipos se tuvieron que adaptar a las necesidades de operación, aunque se encontraran fuera de los rangos permitidos.

## 8. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se describe el análisis causa raíz realizado mediante la metodología PROACT para conocer las causas que produjeron que la bomba 21P04B situada en el tanque nº 4 de la Planta de Regasificación de GNL (Sagunto) no alcanzara la presión al aumentar el caudal ante una solicitud por aumento de la producción durante el mes de mayo de 2018.

Mediante la aplicación de este análisis exhaustivo a través del cual se pueden llegar a conocer las principales causas que produjeron el fallo el equipo, la dirección de la planta, junto con los responsables de los departamentos de operación y mantenimiento, pretenden identificar el precursor de este fallo, puesto que supone un coste muy elevado y existen once equipos más en planta como el analizado, que podrían sufrir los mismos daños si no se toman las medidas adecuadas.

De este análisis se ha deducido que un modo de funcionamiento del equipo por debajo del mínimo caudal permitido, genera un deterioro prematuro de los componentes mecánicos de la bomba, por lo que se hace necesario cuantificar la relación existente entre la reducción del tiempo entre mantenimientos asociado a operar estos equipos fuera de la región preferida y de la permitida, a fin de poder adecuar los planes de mantenimiento vigentes en la instalación.

Además, durante la ejecución del presente análisis se ha conseguido que el fabricante del equipo cuantifique el desgaste que tiene el equipo en cada arranque, cuantificándolo en una hora equivalente por cada arranque. Este dato es muy relevante puesto que todos los equipos tienen un excesivo número de arranques durante su vida útil, lo que podría provocar desgastes prematuros en el equipo o sus componentes.

Otro factor que no se había en cuenta antes de que el equipo fallara es que las condiciones de baja producción y mínimo técnico contribuyen a que la bomba trabaje a caudales bajos y, por tanto, el desgaste de esta sea más acelerado. Por este motivo, el límite de caudal mínimo de los equipos de bombeo se ha aumentado.

Por último, cabe destacar que estos equipos no poseen métodos eficaces de monitorización de vibraciones para su análisis predictivo, lo que contribuye a no poder anticiparse al fallo de la misma. Además, anteriormente, no se estaba realizando ningún análisis de los datos obtenidos a partir del sistema.

A partir de la aplicación de la metodología presentada en este trabajo, todo el equipo de la planta de regasificación ha conocido las causas por las cuales se produjo el fallo durante el mes de mayo del 2018. El resultado de esta aplicación es la selección de varias acciones correctivas mediante las cuales se llegará a conseguir evitar que esas mismas causas produzcan el fallo en equipos. Para ello, es necesario que todo el equipo de mantenimiento y operaciones se vuelque en el desarrollo e implantación de forma continua.

En conclusión, este proyecto permite un ahorro económico para la instalación ya que se reducen los costes de mantenimiento correctivo y se reduce la frecuencia de fallo de los equipos. Adicionalmente, se mejora la eficiencia de los procesos debido a la prevención de problemas e incremento en la confiabilidad de los equipos.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. "Ingeniería de mantenimiento. Técnicas y métodos de aplicación a la fase operativa de los equipos." Adolfo Crespo Márquez, Pedro Moreu de León y Antonico Sánchez Herguedas.
2. "Documentación SAGGAS"
3. "Administración moderna de mantenimiento." Lourival Augusto Tavares.
4. "Documentación aportada por ENAGAS: Guía de implantación del análisis causa raíz"
5. "Root Causes Analysis. Literatura Review." A.D. Livingston, G. Jackson & K. Priestley
6. "Patient Safety, the PROACT Root Cause Analysis Approach." Robert J. Latino.

# Documento II. PRESUPUESTO



## 1. PLANIFICACIÓN DE RECURSOS

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En la implantación y desarrollo de este proyecto se puede diferenciar siete actividades distintas. Este plan incluye una estimación de costes y planificación temporal del proyecto, así como de todos los recursos necesarios para llevar a cabo cada una de las fases que componen el proyecto. Se incluirán los siguientes elementos:

1. Planificación temporal
  - Lista de materiales y cantidades (BOM AND BOQ): hardware, software, recursos humanos
  - Fases del proyecto.
  - Diagrama de Gantt
  
2. Estimación de costos:
  - Tabla de precios unitarios
  - Presupuesto detallado
  - Presupuesto final
  - Análisis de costes y tiempo

### 1.2. LISTA DE MATERIALES Y CANTIDADES

#### 1.1.1. HARDWARE

ID	Descripción	Unidades	Cantidad
HW001	<b>Ordenador portátil - Hp EliteBook 745</b> <i>Intel® Core™ i5-vPro Procesador 1x8GB, AMD, 256GB M.2 PCIe SSD. AMD Radeon™, 14 pulgadas</i>	Uds.	6
HW002	<b>Monitor - HP EliteDisplay E243m</b> <i>Pantalla IPS con retroiluminación LED de 60,45 cm (23,8") antirreflejo, Resolución 1920 x 1080 a 60 Hz, DisplayPort™ 1.2 (compatible con HDCP); VGA y HDMI 1.4 (compatible con HDCP)</i>	Uds.	6

Tabla 1. Descripción recursos hardware

### 1.1.2. SOFTWARE

ID	Descripción	Unidades	Cantidad
SW001	<i>Microsoft Windows 10 Enterprise</i>	Uds.	6
SW002	<i>Microsoft Office Enterprise Suite Suscription</i>	Uds.	6
SW003	<i>SAP software ERP (Enterprise Resource Planning)</i>	Uds.	3
SW004	<i>Server PI Data Link</i>	Uds.	6

Tabla 2. Descripción recursos software

### 1.1.3. RECURSOS HUMANOS

En el desarrollo del proyecto han participado gran parte de los miembros del departamento de mantenimiento de la instalación. Desde los dos técnicos de mantenimiento mecánico y eléctrico hasta un operador de cada rama.

Las tareas de gestión y tutorización han sido desarrolladas por Irene Del Canto Serrano, tutora académica de la Trabajo Final de máster, y María Teresa Bolumar Latorre tutora empresarial del Trabajo Final de Máster y jefa del departamento de mantenimiento.

Se han dividido las diferentes tareas principales y se ha establecido el tiempo asociado por cada uno de los recursos humanos.

ID	Descripción	Unidades	Cantidad
HR001	<i>Estudiante del Máster de Ingeniería Industrial</i>	h.	520
HR002	<i>Tutora académica</i>	h.	60
HR003	<i>Jefa de mantenimiento (tutora empresarial)</i>	h.	95
HR004	<i>Técnico de mantenimiento mecánico</i>	h.	74
HR005	<i>Técnico de mantenimiento eléctrico e instrument.</i>	h.	58
HR006	<i>Operador mecánico</i>	h.	36
HR007	<i>Operador eléctrico</i>	h.	30
HR008	<i>Operador de instrumentación</i>	h.	30

Tabla 3. Descripción recursos humanos

### 1.3. FASES DEL PROYECTO

En el desarrollo de este proyecto se pueden diferenciar siete fases distintas: estudio de los antecedentes, definición del problema, definición del sistema, jerarquización del problema, determinación de las causas raíces, implantación de las soluciones adoptadas y redacción del proyecto. A continuación, se realiza un breve resumen de cada una de ellas y se definen los recursos necesarios para cada fase.

- 1. Estudio de los antecedentes:** en esta fase se analiza la situación en la que se encontraba el equipo y el estado en el que ha quedado el equipo después del fallo. Para ello en esta actividad participan el Técnico Mecánico que es el responsable del mantenimiento del equipo, un operador mecánico y el estudiante en prácticas. La duración de esta actividad es de 3 días, puesto que el técnico mecánico y el operador dedican dos horas de su jornada laboral para analizar junto con el estudiante, dedicación 5 h./día, el estado del equipo.
- 2. Definición del problema:** durante esta fase se define qué, cuándo y dónde se produjo el fallo, y se crea el equipo de trabajo. La duración de esta actividad es de un día puesto que es tarea se desarrolla en una reunión donde participan todos los miembros que forman parte del equipo de trabajo del análisis.
- 3. Definición del sistema:** esta actividad está a cargo de la estudiante del Máster de Ingeniería Industrial, autora de este proyecto. Consiste en la descripción del sistema de producción de la instalación y la descripción del equipo. Esta actividad se realiza durante 1 semana con dedicación de cinco horas diarias.
- 4. Jerarquización del problema:** durante esta etapa se analiza el impacto que ha tenido el fallo del equipo sobre el sistema de producción y se valoran las pérdidas ocasionadas. La duración de esta actividad es de 5 días, y participan en el desarrollo de la misma el técnico mecánico y la estudiante.
- 5. Determinación de las causas raíces:** esta es la fase más importante del proceso de análisis. En primer lugar, se definen las hipótesis que pueden haber causado el fallo y, a continuación, todas ellas son analizadas de forma exhaustiva por todo el equipo de trabajo. La duración total de esta etapa son cuatro semanas.
- 6. Implantación de soluciones:** una vez determinadas las causas raíces el estudiante es el encargado de definir las soluciones para cada una de las hipótesis validadas, las soluciones serán revisadas por la jefa del departamento de mantenimiento. Esta actividad tiene una duración de 6 semanas.
- 7. Redacción del proyecto:** esta tarea se desarrolla durante toda la ejecución del proyecto y tiene una duración estimada de 66 días.

El proceso de análisis causa raíz se puede dividir en tres grandes bloques, dentro de los cuales se desarrollan las fases descritas anteriormente. En la tabla 5 se establece la duración de cada una de las fases del proyecto, y las fechas de comienzo y fin.

<b>Etapa</b>	<b>Duración</b>	<b>F. Inicio</b>	<b>F. Fin</b>
<b>PROYECTO ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (MET. PROACT)</b>			
<b>INICIO Y PLANIFICACIÓN</b>	<b>4 días</b>	<b>16/12/2019</b>	<b>19/12/2019</b>
Estudio de los antecedentes	3 días	16/12/2019	18/12/2019
Definición del problema y creación del equipo	1 día	19/12/2019	19/12/2019
<b>DESARROLLO DEL ANÁLISIS</b>	<b>28 días</b>	<b>23/12/2019</b>	<b>03/02/2020</b>
Definición del proceso	2 días	23/12/2019	26/12/2019
Definición del contexto operacional	3 días	27/12/2019	29/12/2019
Análisis del impacto ocasionado	1 día	30/12/2019	30/12/2019
Valoración de las pérdidas	1 día	02/01/2020	02/01/2020
Definición de modos de fallos e hipótesis	1 día	03/01/2020	03/01/2020
Análisis y validación de las hipótesis	19 días	04/01/2020	02/02/2020
Definición y análisis causas raíces	1 día	03/02/2020	03/02/2020
<b>IMPLANTACIÓN DE SOLUCIONES</b>	<b>30 días</b>	<b>04/02/2020</b>	<b>16/03/2020</b>
Desarrollo de las acciones correctoras	20 días	04/02/2020	02/03/2020
Revisión y control de las acciones correctoras	8 días	20/02/2020	02/03/2020
Implantación de las acciones correctoras	10 días	03/03/2020	16/03/2020
<b>REDACCIÓN Y CONTROL DEL PROYECTO</b>	<b>66 días</b>	<b>16/12/2019</b>	<b>20/03/2020</b>
Desarrollo del proyecto	66 días	16/12/2019	20/03/2020
Revisión por parte de la tutora académica	66 días	16/12/2019	20/03/2020
Revisión por parte de la jefa de mantenimiento	66 días	16/12/2019	20/03/2020

Tabla 4. Diagrama de Gantt

## 2. PRESUPUESTO

### 2.1. TABLAS DE PRECIOS UNITARIOS

#### 2.1.1. SOFTWARE

ID	Descripción	Unidades	Precio unitario
HW001	<b>Ordenador portátil - EliteBook 745</b> <i>Intel® Core™ i5-vPro Procesador 1x8GB, AMD, 256GB M.2 PCIe SSD. AMD Radeon™, 14 pulgadas</i>	Uds.	1.372,68€
HW002	<b>Monitor - HP EliteDisplay E243m</b> <i>Pantalla IPS con retroiluminación LED de 60,45 cm (23,8") antirreflejo, Resolución 1920 x 1080 a 60 Hz, DisplayPort™ 1.2 (compatible con HDCP); VGA y HDMI 1.4 (compatible con HDCP)</i>	Uds.	325,49€

Tabla 5. Precios unitarios software

#### 2.1.2. HARDWARE

ID	Descripción	Unidades	Precio unitario
SW001	<b>Microsoft Windows 10 Enterprise</b>	Uds.	243,79 €
SW002	<b>Microsoft Office Enterprise Suite Suscription</b>	Uds.	154,95€
SW003	<b>SAP software ERP (Enterprise Resource Planning)</b>	Uds.	2.484,85€
SW004	<b>Server PI Data Link</b>	Uds.	375,75€

Tabla 6. Precios unitarios hardware

### 2.1.3. RECURSOS HUMANOS

ID	Descripción	Unidades	Precio unitario
HR001	<i>Estudiante del Máster de Ingeniería Industrial</i>	h.	12,91€/h
HR002	<i>Tutora académica</i>	h.	15,89€/h
HR003	<i>Jefa de mantenimiento (tutora empresarial)</i>	h.	35,41€/h
HR004	<i>Técnico de mantenimiento mecánico</i>	h.	26,38€/h
HR005	<i>Técnico de mantenimiento eléctrico e instrument.</i>	h.	26,38€/h
HR006	<i>Operador mecánico</i>	h.	22,19€/h
HR007	<i>Operador eléctrico</i>	h.	22,19€/h
HR008	<i>Operador de instrumentación</i>	h.	22,19€/h

Tabla 7. Precios unitarios recursos humanos

## 2.2. PRESUPUESTOS PARCIALES

### 2.2.1. HARDWARE

ID	Descripción	UDS	Precio Unit	Cant.	Coste Total
HW001	<b>Ordenador portátil - EliteBook 745</b> <i>Intel® Core™ i5-vPro Procesador 1x8GB, AMD, 256GB M.2 PCIe SSD. AMD Radeon™, 14 pulgadas</i>	Uds.	1.372,68€	6	8.236,08€
HW002	<b>Monitor - HP EliteDisplay E243m</b> <i>Pantalla IPS con retroiluminación LED de 60,45 cm (23,8") antirreflejo, Resolución 1920 x 1080 a 60 Hz, DisplayPort™ 1.2 (compatible con HDCP); VGA y HDMI 1.4 (compatible con HDCP)</i>	Uds.	325,49€	6	1.952,94€
<b>Subtotal: Hardware</b>					<b>10.189,02 €</b>

Tabla 8. Presupuesto parcial hardware

### 2.2.2. SOFTWARE

ID	Descripción	UDS	Precio Unit	Cant.	Coste Total
SW001	<i>Microsoft Windows 10 Enterprise</i>	Uds.	243,79 €	6	1.462,74 €
SW002	<i>Microsoft Office Enterprise Suite Suscription</i>	Uds.	154,95€	6	929,70 €
SW003	<i>SAP software ERP (Enterprise Resource Planning)</i>	Uds.	2.484,85€	3	7.454,55 €
SW004	<i>Server PI Data Link</i>	Uds.	375,75€	6	2.254,50 €
<b>Subtotal: Software</b>					<b>12.101,49 €</b>

Tabla 9. Presupuesto parcial software

### 2.2.3. RECURSOS HUMANOS

ID	Descripción	UDS	Precio Unit	Cant.	Coste Total
HR001	<i>Estudiante del Máster de Ingeniería Industrial</i>	h.	12,91€/h	520	6.713,20 €
HR002	<i>Tutora académica</i>	h.	11,27€/h	60	676,20 €
HR003	<i>Jefa de mantenimiento (tutora empresarial)</i>	h.	35,41€/h	95	3.363,95 €
HR004	<i>Técnico de mantenimiento mecánico</i>	h.	26,38€/h	74	1.952,12 €
HR005	<i>Técnico de mantenimiento eléctrico e instrument.</i>	h.	26,38€/h	58	1.530,04 €
HR006	<i>Operador mecánico</i>	h.	22,19€/h	36	798,84 €
HR007	<i>Operador eléctrico</i>	h.	22,19€/h	30	665,70 €
HR008	<i>Operador de instrumentación</i>	h.	22,19€/h	30	665,70 €
<b>Subtotal: Recursos Humanos</b>					<b>16.365,75 €</b>

Tabla 10. Presupuesto parcial recursos humanos

## 2.3. PRESUPUESTO TOTAL

### 2.3.1. COSTE TOTAL

Descripción	Coste Total
Parte 1: Hardware	10.189,02 €
Parte 2: Software	12.101,49 €
Parte 3: Recursos Humanos	16.365,75 €
<b>Coste total:</b>	<b>38.656,26 €</b>

Tabla 11. Coste total

### 2.3.2. PRESUPUESTO DE LOS SERVICIOS CONTRATADOS

Descripción	Coste Total
Parte 1: Hardware	10.189,02 €
Parte 2: Software	12.101,49 €
Parte 3: Recursos Humanos	16.365,75 €
<b>Coste total:</b>	<b>38.656,26 €</b>
Gastos generales y administrativos (13%)	5.025,31 €
Impuesto de industria (6%)	301,52 €
<b>Coste total con gastos incluidos:</b>	<b>43.983,09 €</b>
IVA (21%)	9.236,45 €
<b>Presupuesto total de los servicios contratados:</b>	<b>53.219,54 €</b>

Tabla 12. Presupuesto de los servicios contratados

El presupuesto de los servicios contratados para llevar a cabo el proyecto asciende a cincuenta y tres mil doscientos diecinueve con cincuenta y cuatro euros.

### 2.3.3. ANÁLISIS DE COSTES Y TIEMPO

El presupuesto planificado del proyecto durante su ejecución se muestra en la figura 1.

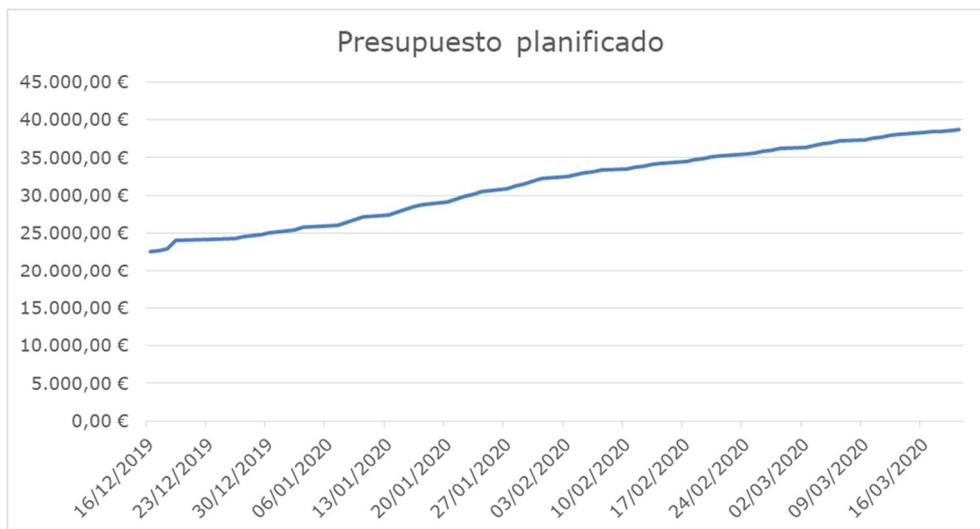


Figura 77. Presupuesto planificado

En el gráfico del presupuesto planificado se destaca que la inversión que hay que hacer para llevar a cabo el proyecto es muy elevada, ya que hay que adquirir los equipos necesarios y software. También se puede observar que la pendiente aumenta en la fase de desarrollo del proyecto debido a que se necesita el trabajo de todo el equipo para llevar a cabo las actividades que componen dicha fase.

El presupuesto planificado por las fases principales que lo componen se muestra en la figura 2.



Figura 78. Presupuesto recursos humanos por fases

En el diagrama de la figura 2, se puede identificar claramente qué fases del proyecto tienen un coste más elevado. Estas son las que tienen una mayor duración y las que implican una mayor necesidad de recursos humanos para llevarlas a cabo.



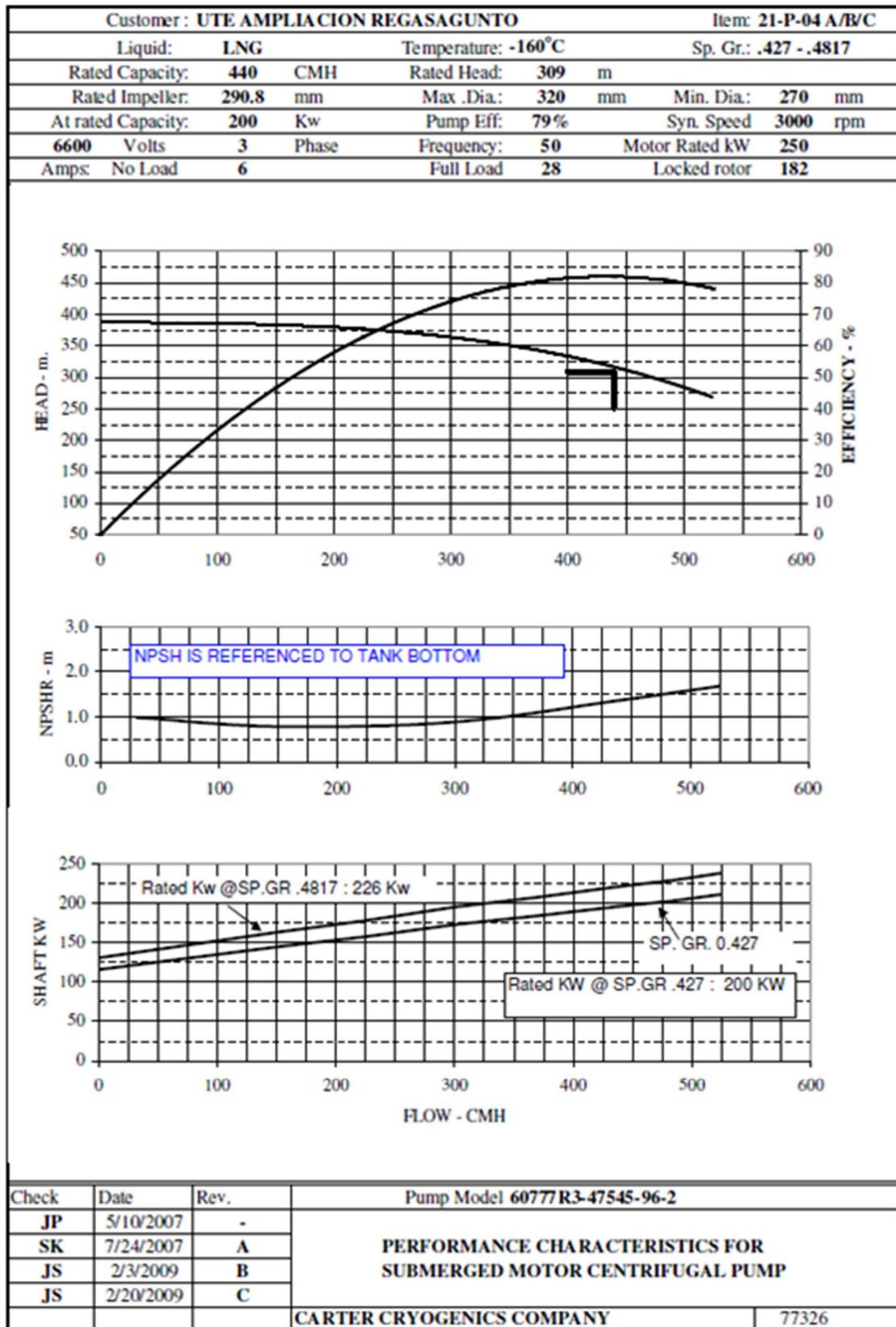
# APÉNDICE A. ANEXOS

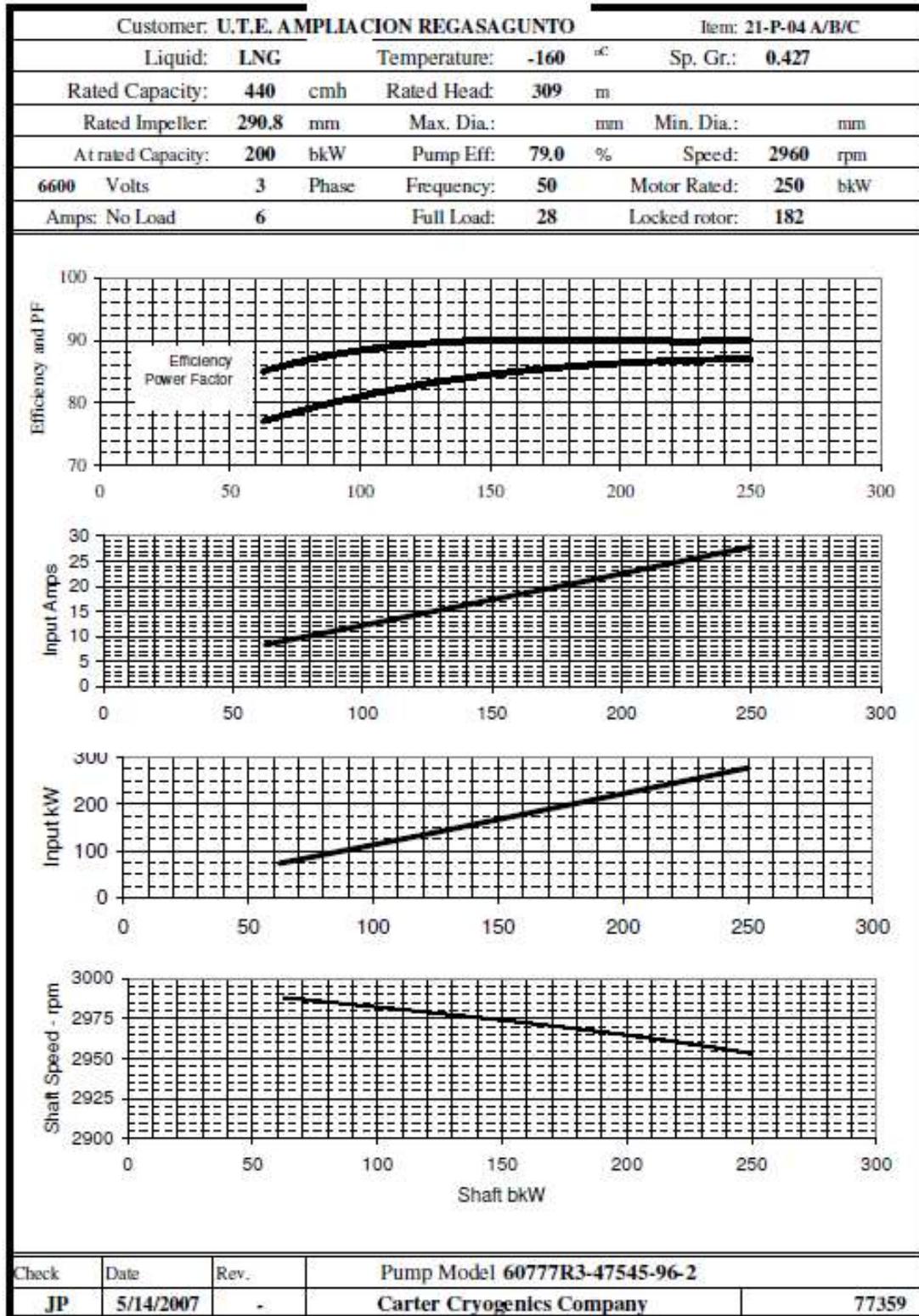


## ANEXO 1: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

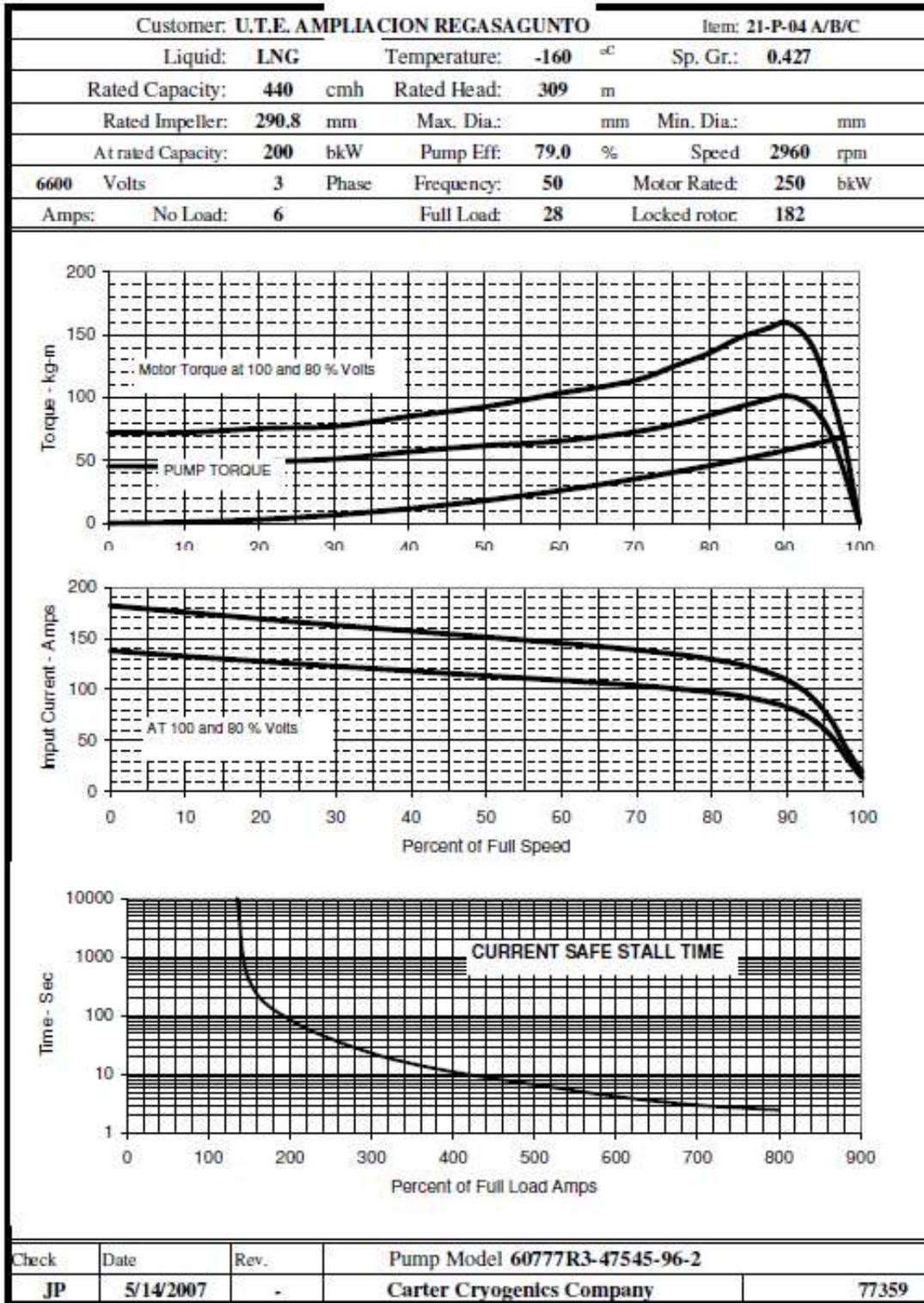
Carter Cryogenics Company 671W, 17 <sup>TH</sup> Street Costa Mesa, CA		REVISION		A		B		C		D	
CENTRIFUGAL PUMP(API 610-10TH) DATA SHEET SI UNITS		DATE		11-3-08		2-3-09		2-20-09			
		BY		JS		JS		JS			
cobra SENER TOYO KANETSU K.K. DYWIDAG		REV/APPR		JP		JP		JP			
		JOB NO.		P227379		DOC. N		6 V-P227379-OC-0004-002			
		PAGE		1		OF		6		REV. NO. B	
1 APPLICABLE TO: <input type="radio"/> PROPOSALS <input checked="" type="radio"/> PURCHASE <input type="checkbox"/> AS BUILT											
2 FOR SAGGAS S.A.		P.O. No. OC-0004									
3 SITE SAGUNTO LNG TERMINAL, SPAIN		SERVICE LNG STORAGE / PRIMARY LNG PUMPS									
4 NO. REQ 3		PUMP SIZE		TYPE VERTICAL IN-TANK		NO. STAGES		3			
5 MANUFACTURER Carter Cryogenics Company		MODEL		60777		Pump Assy. No.		A60777R3-47545-96-2			
6 NOTES INFORMATION BELOW TO BE COMPLETED: <input type="radio"/> BY PURCHASER <input checked="" type="radio"/> BY MANUFACTURER <input type="checkbox"/> BY MANUFACTURER OR PURCHASER											
<b>GENERAL</b>											
8 PUMPS TO OPERATE IN (PARALLEL)		NO. MOTOR DRIVEN		Qty(3) Complete Intank Pumps		NO TURBINE DRIVEN		NA			
9 (SERIES) WITH		PUMP ITEM NO.		21-P-04 A/B/C		PUMP ITEM NO.		NA			
10 GEAR ITEM NO:		MOTOR ITEM NO.		21-PM-04 A/B/C		TURBINE ITEM NO		NA			
11 GEAR PROVIDED BY:		MOTOR PROVIDED BY		Carter Cryogenics		TURBINE MOUNED BY		NA			
12 GEAR MOUNTED BY:		MOTOR MOUNTED BY		Carter Cryogenics		TURBINE DATA SHT NO		NA			
13 GEAR DATA SHT NO.		MOTOR DATA SHT. NO.		V-P227379-OC-0004-0011							
<b>OPERATING CONDITIONS</b>						<b>SITE AND UTILITY DATA (CONT'D)</b>					
14 CAPACITY / NORMAL / RATED		440 / 440 (m <sup>3</sup> /h)		NITROGEN: MAX / MIN PRESS							
16 SUCTION PRESSURE MAX. / RATED		1.97 / 0.2 (Bar g)		REMARKS: Nitrogen only required for purging during pump removal							
17 DISCHARGE PRESSURE		13.14/ 14.91 (Bar g)									
18 DIFFERENTIAL PRESSURE		12.93 Max (Bar)		<b>LIQUID</b>							
19 DIFF. HEAD		309 (m) NPSHA (Note2) 1.69 (m)		TYPE OR NAME OF LIQUID LNG							
20 HYDRAULIC POWER		158.00 (KW)		PUMPING TEMPERATURE:							
21 PROCESS VARIATIONS				NORMAL -160 (°C) MAX. -158.2 (°C) MIN. -164.2 (°C)							
22 SYSTEM SURGE PRESSURE				VAPOR PRESSURE 1.17 bara (°C) -160 (°C)							
23 SERVICE: <input checked="" type="radio"/> CONT. <input type="radio"/> INTERMITTENT (STARTS/DAY)				RELATIVE DENSITY (SPECIFIC GRAVITY) (See Notes 1 & 8, Page 4)							
24 PARALLEL OPERATION REQ'D (2.1.11)SEE NOTE 9				NORMAL 0.427 MAX 0.482 MIN 0.425							
25 SITE AND UTILITY DATA				SPECIFIC HEAT, Cp 3.58 (kJ/kg °C)							
26 LOCATION:				VISCOSITY 0.1120 (mP @ -160.0 (°C)							
27 INDOOR <input type="radio"/> HEATED <input type="radio"/> UNDER ROOF				MAX VISCOSITY 0.1738 (See Note 1 & 8, Page 4)							
28 OUTDOOR <input type="radio"/> UNHEATED <input type="radio"/> PARTIAL SIDES				CORROSIVE / EROSION AGENT							
29 GRADE <input type="radio"/> MEZZANINE <input checked="" type="radio"/> INTANK <input type="radio"/> VESSEL MOUNTED				CHLORIDE CONCENTRATION (ppm)							
30 ELECTRIC AREA CLASSIFICATION				H <sub>2</sub> S CONCENTRATION (ppm)							
31 CL DIV GR II A				LIQUID <input type="radio"/> HAZARDOUS <input checked="" type="radio"/> FLAMMABLE							
32 ZONE 1 Temp T3				OTHER							
33 WINTERIZATION REQ'D <input type="radio"/> TROPICALIZATION REQ'D. <input type="radio"/>				<b>PERFORMANCE</b>							
34 SITE DATA				PROPOSAL CURVE NO. 77326 RPM 2960							
35 ALTITUDE SEA LEVEL(m) BAROMETER 1017.10 (Bar abs)				IMPELLER DIA. RATED 290.8 MAX. 330 MIN. 281 (mm)							
36 RANGE OF AMBIENT TEMPS: MIN / MAX. -3.6 / 39.3 (°C)				RATED POWER 200 (3) KW EFFICIENCY 79 (%)							
37 RELATIVE HUMIDITY: MIN / MAX 63 / 70 (%)				MINIMUM CONTINUOUS FLOW:							
38 UNUSUAL CONDITIONS: <input checked="" type="radio"/> DUST <input type="radio"/> FUMES				THERMAL 150 (m <sup>3</sup> /h) STABLE 150 (m <sup>3</sup> /h)							
39 OTHER Coastal Location + Sand				PREFERRED OPERATING REGION 350 TO 484 (m <sup>3</sup> /h)							
40 UTILITY CONDITIONS:				ALLOWABLE OPERATING REGION 150 TO 525 (m <sup>3</sup> /h)							
41 ELECTRICITY DRIVERS HEATING CONTROL SHUTDOWN				MAX HEAD @ RATED IMPELLER 388 (m)							
42 VOLTAGE 6600		110		24		MAX POWER @ RATED IMPELLER 215 KW					
43 HERTZ 50		DC		DC		NPSHR AT RATED CAPACITY 1.35 (from tank bottom) (1) (m)					
44 PHASE 3						SUCTION SPECIFIC SPEED 6400					
45						MAX. SOUND PRESS. LEVEL REQ'D 85 (dBA)					
46						EST MAX SOUND PRESS. LEVEL 85 (dBA)					
47						REMARKS: See General Remarks					
48						Note 1. NPSHR Reference to 185 mm Above Tank Bottom					
49						Note 2: NPSHA is referenced to pump inducer datum which is assumed to be 410mm above tank bottom.					
50						Note 3: Operating Conditions given this page are based on lean LNG (RHO=426.97 KG/M3)					
51 OTHER											

## ANEXO 2: CURVAS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA

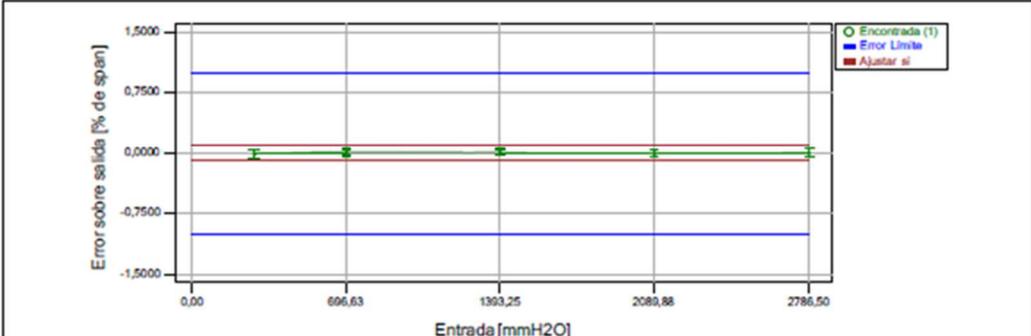




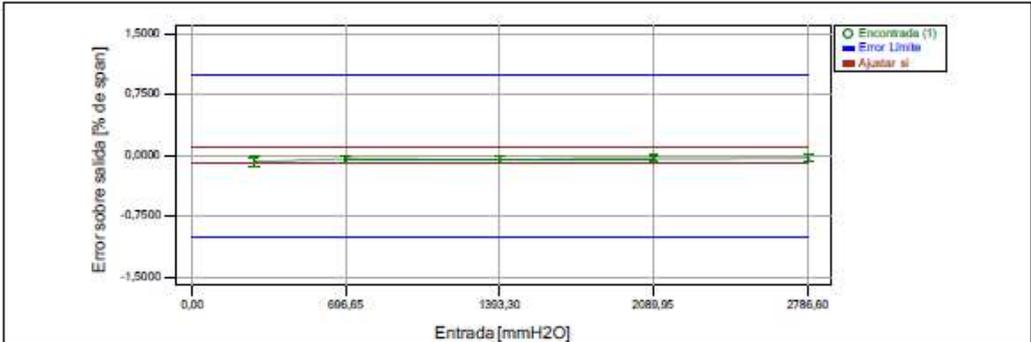
JS 2/3/2009 A



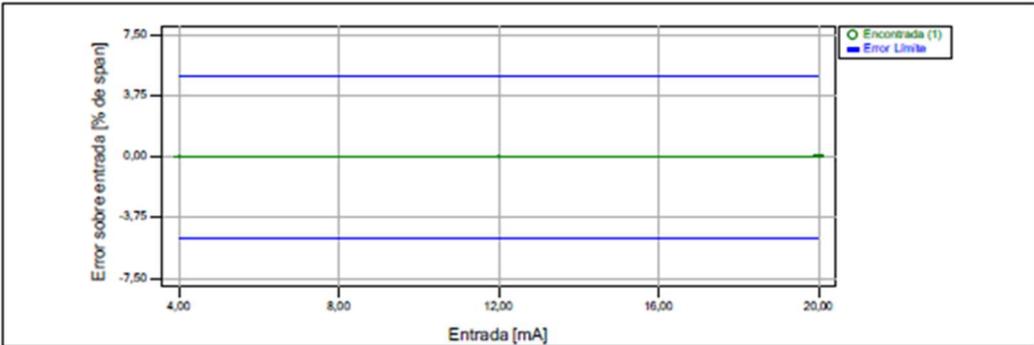
## ANEXO 3: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN 21FT04005A

	<b>CERTIFICADO DE CALIBRACION</b> <b>21FT04005A</b>	Certificado Número: 9581 Fecha de Impresión: 12/07/2019 - Página: 1 -																																																		
LOCALIZACION CAUDAL BOMBA 21-P-04B		COD. PLANTA RS1\RS1A\RS1A21BP4\RS1A21BP4-GR-FT-03\																																																		
EQUIPO	PROCEDIMIENTO	CALIBRACION																																																		
Equipo ID: PT290 Número de serie: 91KA28801 Fabricante: YOKOGAWA Modelo: EJA110A/KU2 Rango de: 0,00 a 2.786,00 mmH2O (R) Rango de salida: 4,00 a 20,00 mA Transferencia: Raíz cuadrada (√x) Fluido de proceso:	Procedimiento calib.: TRANSMISOR DE CAUDAL Desviación max. permitida: 1 % de span Ajustar si desviación medida: 0.10% de span Intervalo calibración: 24 Meses Puntos calibración: 9	Orden de trabajo: <span style="background-color: #e0e0e0;"> </span> Trabajo: Preventivo Fecha Calib. prevista: Feb 2016 Fecha de calibración: 14/02/2017 Próxima calibración: <span style="background-color: #e0e0e0;"> </span> Temperatura amb.: 12,00 °C Humedad relativa: 65,00 % Adquisición de datos: Calibrador																																																		
CALIBRADORES																																																				
Equipo's patrón de entrada: MC5 : 25516067 Módulo entrada: INT400mC : 28544 Fecha Prox. Calib.: 21/11/2017	Equipo patrón de salida: MC5 : 25516067 Módulo salida: E : 35307 Fecha Prox. Calib.: 21/11/2017																																																			
																																																				
<b>1. Encontrado</b>																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="font-size: x-small;">Entrada [mmH2O]</th> <th style="font-size: x-small;">Salida [mA]</th> <th style="font-size: x-small;">Desviación [% de span]</th> <th style="font-size: x-small;">Incert. Expandida [% de span]</th> <th style="font-size: x-small;">Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>283,8</td><td>9,1017</td><td>-0,0197</td><td>± 0,05581</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>697,0</td><td>12,0012</td><td>-0,0104</td><td>± 0,04809</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>1394,4</td><td>15,3197</td><td>0,0019</td><td>± 0,04507</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>2089,5</td><td>17,8560</td><td>-0,0025</td><td>± 0,04679</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>2786,5</td><td>20,0013</td><td>-0,0008</td><td>± 0,04902</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>2090,8</td><td>17,8596</td><td>-0,0070</td><td>± 0,04679</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>1395,3</td><td>15,3231</td><td>0,0003</td><td>± 0,04506</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>696,2</td><td>11,9997</td><td>0,0089</td><td>± 0,0461</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>281,7</td><td>9,0853</td><td>-0,0151</td><td>± 0,05563</td><td>Pasa</td></tr> </tbody> </table>	Entrada [mmH2O]	Salida [mA]	Desviación [% de span]	Incert. Expandida [% de span]	Resultado	283,8	9,1017	-0,0197	± 0,05581	Pasa	697,0	12,0012	-0,0104	± 0,04809	Pasa	1394,4	15,3197	0,0019	± 0,04507	Pasa	2089,5	17,8560	-0,0025	± 0,04679	Pasa	2786,5	20,0013	-0,0008	± 0,04902	Pasa	2090,8	17,8596	-0,0070	± 0,04679	Pasa	1395,3	15,3231	0,0003	± 0,04506	Pasa	696,2	11,9997	0,0089	± 0,0461	Pasa	281,7	9,0853	-0,0151	± 0,05563	Pasa		
Entrada [mmH2O]	Salida [mA]	Desviación [% de span]	Incert. Expandida [% de span]	Resultado																																																
283,8	9,1017	-0,0197	± 0,05581	Pasa																																																
697,0	12,0012	-0,0104	± 0,04809	Pasa																																																
1394,4	15,3197	0,0019	± 0,04507	Pasa																																																
2089,5	17,8560	-0,0025	± 0,04679	Pasa																																																
2786,5	20,0013	-0,0008	± 0,04902	Pasa																																																
2090,8	17,8596	-0,0070	± 0,04679	Pasa																																																
1395,3	15,3231	0,0003	± 0,04506	Pasa																																																
696,2	11,9997	0,0089	± 0,0461	Pasa																																																
281,7	9,0853	-0,0151	± 0,05563	Pasa																																																
Comentario: <span style="background-color: #e0e0e0; display: inline-block; width: 500px; height: 15px;"></span>																																																				
<b>Observaciones:</b> <b>PASA:</b> La desviación en el punto calibrado, es inferior a la desviación max. permitida. <b>NO PASA:</b> La desviación en el punto calibrado, es superior a la desviación max. permitida. (1): Debido a la incertidumbre asignada en el punto calibrado, no puede asegurarse para un nivel de confianza superior al 95% que el instrumento se encuentre dentro de las especificaciones señaladas. La incertidumbre expandida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura K=2, que para una distribución normal corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%. El cálculo se ha efectuado conforme a la guía europea EA-4/0																																																				
FIRMA ELECTRÓNICA																																																				
Calibrado por José Luis Caballero - SAGGAS	Aprobado por José Luis Caballero - SAGGAS 14/02/2017																																																			

## ANEXO 4: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN 21FT04005B

	<b>CERTIFICADO DE CALIBRACION</b> <b>21FT04005B</b>	Certificado Número: 9592 Fecha de Impresión: 12/07/2019 - Página: 1 -																																																		
LOCALIZACION CAUDAL BOMBA 21-P-04B (SIS)		COD. PLANTA RS1RS1A/RS1A21BP4/RS1A21BP4-GR.FT-04/																																																		
EQUIPO	PROCEDIMIENTO	CALIBRACION																																																		
Equipo ID: PT291 Número de serie: 9J1KA28798 Fabricante: YOKOGAWA Modelo: EJA110A/KU2 Rango de: 0,00 a 2.786,00 mmH2O (R) Rango de salida: 4,00 a 20,00 mA Transferencia: Raíz cuadrada (√x) Fluido de proceso:	Procedimiento calib.: TRANSMISOR DE CAUDAL Desviación max. permitida: 1 % de span Ajustar si desviación medida: 0.10% de span Intervalo calibración: 24 Meses Puntos calibración: 9	Orden de trabajo: Trabajo: Preventivo Fecha Calib. prevista: Feb 2016 Fecha de calibración: 14/02/2017 Próxima calibración: Temperatura amb.: 12,00 °C Humedad relativa: 85,00 % Adquisición de datos: Calibrador																																																		
CALIBRADORES																																																				
Equipo/s patrón de entrada: MC5 : 25516067 Módulo entrada: INT400mC : 28544 Fecha Prox. Calib.: 21/11/2017	Equipo patrón de salida: MC5 : 25516067 Módulo salida: E : 35307 Fecha Prox. Calib.: 21/11/2017																																																			
																																																				
1. Encontrado																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Entrada [mmH2O]</th> <th>Salida [mA]</th> <th>Desviación [% de span]</th> <th>Incert. Expandida [% de span]</th> <th>Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>283,0</td><td>9,0878</td><td>-0,0740</td><td>± 0,05583</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>695,4</td><td>11,9944</td><td>-0,0580</td><td>± 0,04809</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>1391,9</td><td>15,3008</td><td>-0,0540</td><td>± 0,04504</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>2088,7</td><td>17,6459</td><td>-0,0491</td><td>± 0,04676</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>2786,6</td><td>19,9960</td><td>-0,0358</td><td>± 0,04868</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>2089,9</td><td>17,6527</td><td>-0,0315</td><td>± 0,04676</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>1393,8</td><td>15,3087</td><td>-0,0516</td><td>± 0,04504</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>696,6</td><td>11,9932</td><td>-0,0461</td><td>± 0,04808</td><td>Pasa</td></tr> <tr><td>281,9</td><td>9,0771</td><td>-0,0776</td><td>± 0,05581</td><td>Pasa</td></tr> </tbody> </table>	Entrada [mmH2O]	Salida [mA]	Desviación [% de span]	Incert. Expandida [% de span]	Resultado	283,0	9,0878	-0,0740	± 0,05583	Pasa	695,4	11,9944	-0,0580	± 0,04809	Pasa	1391,9	15,3008	-0,0540	± 0,04504	Pasa	2088,7	17,6459	-0,0491	± 0,04676	Pasa	2786,6	19,9960	-0,0358	± 0,04868	Pasa	2089,9	17,6527	-0,0315	± 0,04676	Pasa	1393,8	15,3087	-0,0516	± 0,04504	Pasa	696,6	11,9932	-0,0461	± 0,04808	Pasa	281,9	9,0771	-0,0776	± 0,05581	Pasa		
Entrada [mmH2O]	Salida [mA]	Desviación [% de span]	Incert. Expandida [% de span]	Resultado																																																
283,0	9,0878	-0,0740	± 0,05583	Pasa																																																
695,4	11,9944	-0,0580	± 0,04809	Pasa																																																
1391,9	15,3008	-0,0540	± 0,04504	Pasa																																																
2088,7	17,6459	-0,0491	± 0,04676	Pasa																																																
2786,6	19,9960	-0,0358	± 0,04868	Pasa																																																
2089,9	17,6527	-0,0315	± 0,04676	Pasa																																																
1393,8	15,3087	-0,0516	± 0,04504	Pasa																																																
696,6	11,9932	-0,0461	± 0,04808	Pasa																																																
281,9	9,0771	-0,0776	± 0,05581	Pasa																																																
Comentario: <span style="background-color: #e0e0ff; display: inline-block; width: 500px; height: 15px;"></span>																																																				
Observaciones: <b>PASA:</b> La desviación en el punto calibrado, es inferior a la desviación max. permitida. <b>NO PASA:</b> La desviación en el punto calibrado, es superior a la desviación max. permitida. (1): Debido a la incertidumbre asignada en el punto calibrado, no puede asegurarse para un nivel de confianza superior al 95% que el instrumento se encuentre dentro de las especificaciones señaladas. La incertidumbre expandida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura K=2, que para una distribución normal corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%. El cálculo se ha efectuado conforme a la guía europea EA-4/0																																																				
FIRMA ELECTRÓNICA																																																				
Calibrado por José Luis Caballero - SAGGAS	Aprobado por José Luis Caballero - SAGGAS 14/02/2017																																																			

## ANEXO 5: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN 21FV04005

	<b>CERTIFICADO DE CALIBRACION</b> 21FV04005	Certificado Número: 9586 Fecha de Impresión: 12/07/2019 - Página: 1 -																														
LOCALIZACION VALV. RECIRC. TANQUE DE 21-P-04B      COD. PLANTA RS1RS1A/RS1A21BP4/RS1A21BP4-FV005\																																
EQUIPO	PROCEDIMIENTO	CALIBRACION																														
Equipo ID: FV033 Número de serie: EU03673313 Fabricante: FIELDVUE Modelo: DVC6010 Rango de: 4,00 a 20,00 mA Rango de salida: 100,00 a 0,00 % Transferencia: Lineal Fluido de proceso:	Procedimiento calib.: VALVULA CONTROL Desviación max. permitida: 5 % de span Ajustar si desviación medida: 0,00% de span Intervalo calibración: 24 Meses Puntos calibración: 5	Orden de trabajo: Trabajo: Preventivo Fecha Calib. prevista: Feb 2016 Fecha de calibración: 14/02/2017 Próxima calibración: Temperatura amb.: 12,00 °C Humedad relativa: 65,00 % Adquisición de datos: Calibrador																														
<b>CALIBRADORES</b>																																
Equipo's patrón de entrada: MC5 : 25518067 Módulo entrada: E : 35307 Fecha Prox. Calib.: 21/11/2017	Equipo patrón de salida: N/A Módulo salida: N/A Fecha Prox. Calib.: N/A																															
																																
<b>1. Encontrado</b>																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>Entrada [mA]</th> <th>Salida [%]</th> <th>Desviación [% de span]</th> <th>Incert. Expandida [% de span]</th> <th>Resultado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4,0000</td> <td>100,000</td> <td>0,00</td> <td>± 0,01439</td> <td>Pasa</td> </tr> <tr> <td>12,0001</td> <td>50,000</td> <td>0,00</td> <td>± 0,02438</td> <td>Pasa</td> </tr> <tr> <td>20,0002</td> <td>0,000</td> <td>0,00</td> <td>± 0,03438</td> <td>Pasa</td> </tr> <tr> <td>12,0000</td> <td>50,000</td> <td>0,00</td> <td>± 0,02438</td> <td>Pasa</td> </tr> <tr> <td>4,0000</td> <td>100,000</td> <td>0,00</td> <td>± 0,01439</td> <td>Pasa</td> </tr> </tbody> </table>	Entrada [mA]	Salida [%]	Desviación [% de span]	Incert. Expandida [% de span]	Resultado	4,0000	100,000	0,00	± 0,01439	Pasa	12,0001	50,000	0,00	± 0,02438	Pasa	20,0002	0,000	0,00	± 0,03438	Pasa	12,0000	50,000	0,00	± 0,02438	Pasa	4,0000	100,000	0,00	± 0,01439	Pasa		
Entrada [mA]	Salida [%]	Desviación [% de span]	Incert. Expandida [% de span]	Resultado																												
4,0000	100,000	0,00	± 0,01439	Pasa																												
12,0001	50,000	0,00	± 0,02438	Pasa																												
20,0002	0,000	0,00	± 0,03438	Pasa																												
12,0000	50,000	0,00	± 0,02438	Pasa																												
4,0000	100,000	0,00	± 0,01439	Pasa																												
Comentario:																																
<b>Observaciones:</b> <b>PASA:</b> La desviación en el punto calibrado, es inferior a la desviación max. permitida. <b>NO PASA:</b> La desviación en el punto calibrado, es superior a la desviación max. permitida. (1): Debido a la incertidumbre asignada en el punto calibrado, no puede asegurarse para un nivel de confianza superior al 95% que el instrumento se encuentre dentro de las especificaciones señaladas. La incertidumbre expandida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica combinada por el factor de cobertura K=2, que para una distribución normal corresponde a una probabilidad de aproximadamente el 95%. El cálculo se ha efectuado conforme a la guía europea EA-4/0																																
FIRMA ELECTRÓNICA																																
Calibrado por José Luis Caballero - SAGGAS	Aprobado por José Luis Caballero - SAGGAS 14/02/2017																															