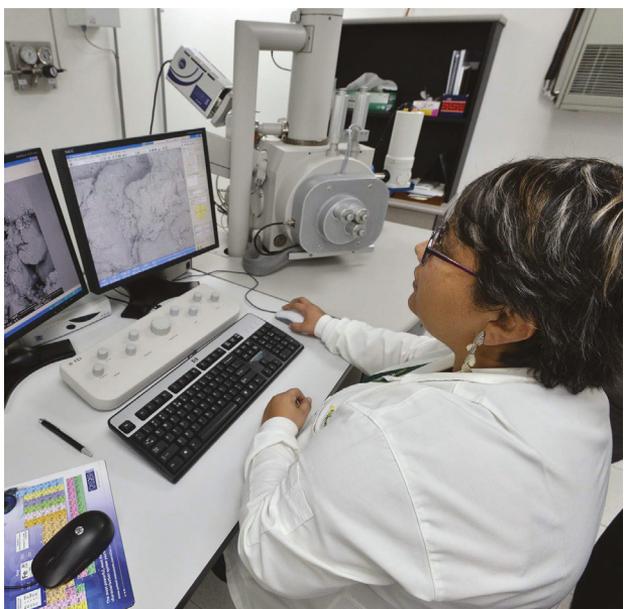


Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D) en un centro de innovación y tecnología del sector *oil & gas*: nivel operacional



Universidad
Pontificia
Bolivariana

**ecopETROL**

Autores

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

Alfonso Santos Jaimes
Juan Carlos Villamizar
Lina María Ardila Solano
Maryory P. Villamizar León
Marcela Villa Marulanda
Ómar Pinzón Ardila
Pedro Nel Jaimes Jaimes
Silvia Alejandra Sotelo López

ECOPETROL S.A.

Carlos Andrés González
David de Jesús Pérez
Héctor Julio Picón
Laura Liliana Garzón
Rossvan Johan Plata Villamizar

**Gestión de la confiabilidad
de activos de investigación
y desarrollo (I+D) en un centro
de innovación y tecnología del sector
oil & gas: nivel operacional**

Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga
Ecopetrol S.A.

© Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga
© Ecopetrol - Instituto Colombiano del Petróleo
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana
Vigilada Mineducación

Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D) en un centro de innovación y tecnología del sector *oil & gas*: nivel operacional

ISBN: 978-628-500-047-8 (Versión impresa)

ISBN: 978-628-500-048-5 (Versión digital)

DOI: <http://doi.org/10.18566/978-628-500-048-5>

Primera edición, 2022

Facultad de Ingeniería, Mecánica, Industrial, Electrónica, Eléctrica. Grupo: PROLOG, Control Industrial, GideTechMA, BISEMIC. Proyecto: Optimización del mantenimiento: Nivel Táctico. Acuerdo de Cooperación No. 10 – Convenio Marco No. 5226851. Seccional Bucaramanga

Arzobispo de Medellín y Gran Canciller UPB: Mons. Ricardo Tobón Restrepo

Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Rector Seccional Bucaramanga: Presbítero Gustavo Méndez Paredes

Vicerrectora Académica Seccional Bucaramanga: Ana Fernanda Uribe Rodríguez

Decana de la Escuela de Ingenierías Seccional Bucaramanga: Johanna Marcela Suárez Pedraza

Gestora Editorial Seccional Bucaramanga: Ginette Rocío Moreno Cañas

Editor: Juan Carlos Rodas Montoya

Corrección de Estilo: Carlos Alberto Calderón Gallego

Coordinación de Producción: Ana Milena Gómez Correa

Diagramación: Marta Lucía Gómez Zuluaga

Dirección Editorial:

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2022

Correo electrónico: editorial@upb.edu.co

www.upb.edu.co

Telefax: (57)(4) 354 4565

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

Radicado: 2199-13-05-22

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana y Ecopetrol S.A..

Autores

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA - Seccional Bucaramanga

Alfonso Santos Jaimes
Juan Carlos Villamizar
Lina María Ardila Solano
Maryory P. Villamizar León
Marcela Villa Marulanda
Ómar Pinzón Ardila
Pedro Nel Jaimes Jaimes
Silvia Alejandra Sotelo López

ECOPETROL S.A.

Carlos Andrés González
David de Jesús Pérez
Héctor Julio Picón
Laura Liliana Garzón
Rossvan Johan Plata Villamizar

Apoyos institucionales convenio marco de cooperación tecnológica UPB Ecopetrol 2018

Director Instituto Colombiano del Petróleo (ICP),
Centro de Innovación y tecnología de Ecopetrol S.A.:
Andrés Eduardo Mantilla Zárate

Rector General UPB:
Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

Administrador del convenio marco de cooperación tecnológica, Ecopetrol - ICP:
Gonzalo Leal Díaz

Administrador del convenio marco de cooperación tecnológica, UPB:
Ariel René Carreño Olejua

Administrador del acuerdo de cooperación No. 08, Ecopetrol - ICP:
Nilsson Javier Martínez Pérez

Administradora del acuerdo de cooperación No. 08, UPB:
Gladys Elena Rueda Barrios

Gestor Técnico del acuerdo de cooperación No. 08, Ecopetrol - ICP:
Gabriel Cáceres Flórez

Líder Técnico del acuerdo de cooperación No. 08, UPB
Maryory Patricia Villamizar León



Agradecimientos

*A las entidades, instituciones y personas que apoyaron
la realización del proyecto*

Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga

Ecopetrol-ICP

*Gonzalo Leal Díaz,
Administrador del Convenio Marco de Cooperación Tecnológica,
Ecopetrol-ICP*

*Ariel René Carreño Olejua,
Administrador del Convenio Marco de Cooperación Tecnológica, UPB*

*Gladys Elena Rueda Barrios
Administradora del Acuerdo de Cooperación, UPB*

*Nilsson Javier Martínez Pérez
Administrador del Acuerdo de Cooperación, Ecopetrol- ICP*

*Gabriel Cáceres Flórez
Gestor Técnico, Ecopetrol-ICP*

*Maryory Patricia Villamizar León
Líder Técnico del Acuerdo de Cooperación, UPB*

*Rossvan Johan Plata Villamizar
Líder Técnico del Acuerdo de Cooperación, Ecopetrol-ICP*

*Germán Augusto Amaya Rubio
Profesional de Apoyo Técnico, UPB*



Contenido

Alianzas para el progreso	17
Introducción: nivel operacional	19
Plan óptimo de mantenimiento para un Centro I+D.....	23
Capítulo 1. Modelos de fiabilidad de una planta piloto de procesos térmicos	25
1.1 Introducción	27
1.2 Planta piloto de procesos térmicos: sistemas y componentes	27
1.3 Jerarquización de la planta piloto de procesos térmicos	30
1.4 Variables aleatorias y métricas.....	37
1.5 Caracterización probabilística de la fiabilidad para los equipos de la planta piloto.....	41
1.5.1 Base de datos OREDA 2015.....	41
1.5.2 Consolidación de resultados para los equipos de la planta piloto	43
1.6 Gráficos de control para el monitoreo de los equipos de la planta piloto.....	50
1.6.1 Gráficos de control bilaterales.....	50
1.6.1.1 Gráfico de control para una variable aleatoria descrita por una distribución normal.....	53
1.6.1.2 Gráfico de control para una variable aleatoria descrita por una distribución asimétrica	53
1.6.2 Gráficos de control para el monitoreo del tiempo entre fallas de los equipos reparables	55
1.6.3 Gráficos de control para la bomba de desplazamiento positivo	57
1.6.4 Gráficos de control para el reactor.....	59
Conclusiones	62
Capítulo 2. Línea base de los planes de mantenimiento asociados a una planta piloto de procesos térmicos	65
2.1 Introducción	67



10 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

2.2	Características del mantenimiento ejecutado en la actualidad.....	68
2.3	Frecuencia de mantenimiento	69
2.4	Componentes a sustituir o reacondicionar y su respectiva frecuencia.....	70
2.5	Recurso humano y su estimación.....	71
2.6	Actividades de calibración requeridas	71
2.7	Equipos y herramientas requeridas para las actividades de mantenimiento	72
	Conclusiones	73

Capítulo 3. Análisis de fiabilidad de sistemas asociados

	a una planta piloto de procesos térmicos	75
3.1	Introducción	77
3.2	Generalidades de los Diagramas P&ID	77
3.2.1	Diagramas de Bloques de Fiabilidad, RBD.....	80
3.2.1.1	RBD en serie.....	81
3.2.1.2	RBD en paralelo.....	81
3.2.1.3	RBD mixto	82
3.2.1.4	RBD en paralelo con k de n.....	83
3.2.1.5	RBD en paralelo pasiva.....	84
3.3	Árboles de fallo apropiado a las características del sistema	84
3.4	Efectos de las funciones de fiabilidad de los diferentes componentes en funcionamiento del sistema, en términos de probabilidad, detección y desempeño.....	88
3.4.1	Funcionamiento del sistema	88
3.4.2	Sistemas de la Planta de Procesos Térmicos	88
3.4.2.1	Sistema de aire de instrumentación	89
3.4.2.2	Sistema de nitrógeno	90
3.4.2.3	Sistema de limpieza.....	90
3.4.2.4	Sistema de carga.....	90
3.4.2.5	Sistema de reacción	91
3.4.2.6	Sistema de separación.....	92
3.4.2.7	Sistema de condensación	92
3.4.2.8	Sistema de producto	92
3.4.2.9	Sistema de alivio de presión	93
3.5	Ecuación que integra los parámetros de fiabilidad para los diferentes sistemas.....	93



3.6	Resultados de fiabilidad de la planta.....	98
3.7	Elementos que deben funcionar correctamente para que el sistema cumpla su función prevista	100
3.8	Riesgo y nivel de afectación en términos de seguridad	103
	Conclusiones	116
Capítulo 4.	Planeación de recursos humanos y materiales.....	117
4.1	Introducción.....	119
4.2	Algoritmos de asignación de recursos humanos: modelos de líneas de espera.....	120
4.2.1	Modelos de líneas de espera con distribuciones markovianas (Poisson y exponencial)	122
4.2.2	Modelos de líneas de espera con distribuciones no markovianas	122
4.2.2.1	Modelos con llegadas de Poisson y tiempo de servicio no exponencial	122
4.2.2.2	Modelos sin llegadas de Poisson y tiempo de servicio exponencial	123
4.2.2.3	Modelos sin llegadas de Poisson y tiempo de servicio no exponencial	124
4.2.3	Revisión de literatura, modelos de líneas de espera y mantenimiento preventivo.....	125
4.2.3.1	Conclusiones de la revisión.....	127
4.3	Algoritmos de asignación de recursos materiales: Modelos de inventarios.....	128
4.3.1	Modelos de inventarios determinísticos cantidad económica de pedido (EOQ)	130
4.3.2	Modelos de inventarios probabilísticos.....	131
4.3.2.1	Modelo (S-1, S).....	133
4.3.3	Revisión de literatura modelo de inventarios y mantenimiento preventivo.....	134
4.3.3.1	Conclusiones de la revisión.....	137
4.4	Cantidad de recurso humano, tiempo de la tarea de mantenimiento y materiales necesarios, obtenidos por los modelos de optimización para la implementación del plan de mantenimiento a partir de los parámetros de fiabilidad del sistema	138
4.4.1	Modelo G/G/m para la asignación de recurso humano.....	138



12 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

4.4.2 Diferencia en magnitud en la asignación de recursos entre el plan actual de mantenimiento (Línea base) y la obtenida a través de la optimización de recursos a través del modelado	141
4.4.3 Modelo (S-1, S) para la asignación de recurso material	142
Conclusiones	149

Capítulo 5. Simulación de escenarios de mantenimiento

preventivo para una planta piloto de procesos térmicos	147
5.1 Introducción	149
5.2 Escenario de mantenimiento preventivo basado en modelo de minimización de costes basado en el reemplazo preventivo por tiempo (edad constante)	154
5.2.1 Modelo para el cálculo del costo de mantenimiento preventivo y correctivo	156
5.3 Escenarios para el mantenimiento preventivo y su comparación con la línea base de planes de mantenimiento actuales	156
5.3.1 Intervalo entre mantenimientos preventivos.....	156
5.3.2 Escenarios propuestos para el mantenimiento preventivo.....	160
5.3.3 Línea base	163
5.3.4 Comparación mantenimiento línea base.....	165
5.3.5 Magnitud del recurso humano y material, en los diferentes escenarios dados por los parámetros de fiabilidad, tareas y frecuencias del mantenimiento a realizar	166
Conclusiones	170
Referencias	173



Lista de tablas

Tabla 1.	Definición de los niveles de las jerarquías.....	29
Tabla 2.	Componentes de los equipos de la planta piloto y clasificación según su reparabilidad	32
Tabla 3.	Resultados de la jerarquización de los equipos de la planta piloto	37
Tabla 4.	Resumen de expresiones matemáticas para la fiabilidad por diferentes funciones de distribución de probabilidad	40
Tabla 5.	Distribuciones de probabilidad para los equipos de la planta piloto	43
Tabla 6.	Métricas de fiabilidad para los equipos de la planta piloto para un semestre y un año.	44
Tabla 7.	Modos de falla.....	46
Tabla 8.	Modos de fallo genéricos OREDA 2015.....	47
Tabla 9.	Fiabilidad y tasas de falla	49
Tabla 10.	Coeficientes A2 para diferentes tamaños de la muestra	55
Tabla 11.	Tiempos entre fallos para los equipos: mantenimiento correctivo (co) y mantenimiento preventivo (pvo)	56
Tabla 12.	Análisis estadístico entre fallos para la bomba desplazamiento positivo.....	57
Tabla 13.	Análisis entre fallos para el reactor	59
Tabla 14.	Resultados equipos programados para mantenimiento..	69
Tabla 15.	Resultados ajustes de componentes	70
Tabla 16.	Resultados recurso humano.....	71
Tabla 17.	Resultados actividades de calibración	72
Tabla 18.	Resultados herramientas requeridas.....	73
Tabla 19.	Significados de la medida o variable de inicialización	78
Tabla 20.	Significado del modificador	78
Tabla 21.	Significado de la función pasiva.....	78
Tabla 22.	Significado de la función de salida	78

14 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

Tabla 23.	Significado del modificador de función.....	79
Tabla 24.	Ejemplos de tag con su respectivo significado.....	79
Tabla 25.	Ecuaciones de fiabilidad para la planta piloto y los sistemas que la componen	94
Tabla 26.	Resultados de fiabilidad por sistemas de la planta	97
Tabla 27.	Resultados fiabilidad planta piloto.....	98
Tabla 28.	Listado de criticidad de equipos	99
Tabla 29.	Elementos que deben funcionar correctamente para el éxito de los sistemas en la planta piloto de procesos térmicos	100
Tabla 30.	Nodos asociados a la Planta Piloto de Procesos Térmicos	115
Tabla 31.	Eventos peligrosos para los nodos de la Planta Piloto de Procesos Térmicos.....	115
Tabla 32.	Modelos de línea de espera en la literatura.....	127
Tabla 33.	Modelos de inventario según el sistema de revisión	132
Tabla 34.	Características de los modelos publicados	136
Tabla 35.	Resultados del modelo G/G/m	140
Tabla 36.	Comparación entre recurso humano actual y optimizado	141
Tabla 37.	Resultados del modelo (S-1, S) y recomendaciones según fiabilidad.....	143
Tabla 38.	Artículos asociados con el cálculo de intervalo óptimo de MP (Formulación Matemática)	152
Tabla 39.	Artículos asociados con el cálculo de intervalo óptimo de MP (Inteligencia Artificial)	152
Tabla 40.	Costos totales de mantenimiento por equipo.....	157
Tabla 41.	Comparación entre frecuencias de mantenimiento establecida vs optimizada	159
Tabla 42.	Consolidación de costo de mantenimiento correctivo, preventivo y total optimizado para la planta	161
Tabla 43.	CCV para la Planta de Procesos Térmicos.....	163
Tabla 44.	Resultados de costos	165
Tabla 45.	Estadísticas de análisis.....	166
Tabla 46.	Recursos según escenarios de fiabilidad	166
Tabla 47.	Resultado consolidado de optimización de mantenimiento.....	169



Lista de figuras

Figura 1.	Jerarquización de la planta piloto de procesos térmicos.....	28
Figura 2.	Esquema planta piloto de procesos térmicos.....	30
Figura 3.	Clasificación de los equipos pertenecientes a la planta piloto.....	37
Figura 4.	Tiempo de operación equivalente para artículos IOI.....	39
Figura 5.	Tradicional u-chart para el monitoreo del número de fallas por unidad de tiempo.....	52
Figura 6.	Gráfico de control bomba desplazamiento positivo – Distribución normal.....	58
Figura 7.	Gráfico de control bomba desplazamiento positivo – Distribución asimétrica	
Figura 8.	Gráfico de control para el Reactor – Distribución Normal.....	60
Figura 9.	Gráfico de control para el Reactor – Distribución Asimétrica.....	61
Figura 10.	Porcentaje de equipos calibrados.....	72
Figura 11.	Configuración en serie para diagramas de bloques.....	81
Figura 12.	Configuración en paralelo.....	82
Figura 13.	Configuración mixta para diagramas de bloques.....	82
Figura 14.	Configuración mixta para diagramas de bloques.....	83
Figura 15.	Configuración en paralelo con “k” de “n”, para diagramas de bloques.....	83
Figura 16.	Configuración en paralelo pasiva para diagramas de bloques.....	84
Figura 17.	Métodos para el análisis por árbol de fallos.....	85
Figura 18.	Compuertas lógicas utilizadas para la elaboración del árbol de fallo.....	87
Figura 19.	RBD por sistemas.....	89
Figura 20.	Sistema de aire de instrumentación.....	89
Figura 21.	Sistema de nitrógeno.....	90
Figura 22.	Sistema de limpieza.....	90
Figura 23.	Sistema de carga.....	90
Figura 24.	Subsistema Carga 1.....	91

Figura 25.	Subsistema Carga 2	91
Figura 26.	Sistema de reacción	91
Figura 27.	Sistema de separación	92
Figura 28.	Sistema de condensación.....	92
Figura 29.	Subsistema 1: producto fondos viscorreducidos. Sistema de producto.....	92
Figura 30.	Subsistema 2: producto Nafta.....	93
Figura 31.	Sistema de alivio de presión.....	93
Figura 32.	Proceso utilizado para obtener las magnitudes de fiabilidad de los componentes y equipos que conforman la planta piloto de procesos térmicos	96
Figura 33.	Árbol de fallo general	105
Figura 34.	Árbol de fallo sistema nitrógeno.....	106
Figura 35.	Árbol de fallo sistema limpieza	106
Figura 36.	Árbol de fallo sistema de carga.....	107
Figura 37.	Árbol de fallo subsistemas de carga 1.....	108
Figura 38.	Árbol de fallo subsistemas de carga 2.....	109
Figura 39.	Árbol de fallo sistema de reacción.....	111
Figura 40.	Árbol de fallo sistema de separación	112
Figura 41.	Árbol de fallo sistema de producto.....	113
Figura 42.	Árbol de fallo sistema de alivio de presión.....	114
Figura 43.	Proceso típico para los modelos de inventarios	128
Figura 44.	Representación gráfica del C (ti) para el Baño de enfriamiento y la Bomba desplazamiento positivo	159



Alianzas para el progreso

En el año 2016 firmamos la Alianza Tecnológica entre la UPB y Ecopetrol para "aunar esfuerzos hacia el desarrollo y fortalecimiento conjunto de capacidades institucionales en el sector oil & gas, con el fin de promover e impulsar un entorno regional de crecimiento sostenible, mediante la realización conjunta de actividades científicas, tecnológicas y de innovación".

Se trata de un caso de éxito de la dinámica para la competitividad de la región y el país, mediante la alianza Universidad-Empresa-Estado, como actores del desarrollo económico.

La investigación colaborativa y el desarrollo de soluciones tecnológicas bajo un mismo techo que hemos implementado, en el marco de principios éticos, responsables y de confianza mutua, nos han permitido generar nuevo conocimiento, desarrollo tecnológico y formación de recurso humano, en la comprensión de problemas reales desde diferentes perspectivas teórico-prácticas.

En esta oportunidad, nuestro foco fue analizar como línea de investigación la gestión de activos de un centro de innovación y tecnología, es decir, cómo hacer que los equipos que soportan las investigaciones, así como sus instalaciones e infraestructura, son fuente de generación de valor a partir de la alineación de las estrategias con la operación de los mismos, maximizando el tiempo de vida útil y alcanzando los objetivos corporativos que se formulan desde la alta dirección.

Además, mediante una adecuada política de confiabilidad de los activos de I+D, garantizar el funcionamiento duradero e ininterrumpido en el tiempo, sin variar los estándares de calidad de sus actividades, logrando la optimización de su mantenimiento y por ende los beneficios a la empresa.

Los resultados de este trabajo colaborativo facilitaron la transferencia de conocimiento y aprendizaje en doble vía, fortaleciendo las competencias en el saber, ser y hacer de los estudiantes y profesionales involucrados, mediante trabajos de grado de nivel de pregrado y posgrado, publicación de artículos científicos, ponencias nacionales e internacionales y desarrollos tecnológicos y de innovación que contribuyen al desarrollo de la industria.

Hoy compartimos esta obra de investigación que ha sido posible gracias a la participación y compromiso de directivos, administradores, profesores, estudiantes de pregrado y posgrado de la Universidad Pontificia Bolivariana, así como de los funcionarios del Instituto Colombiano del Petróleo, Centro de Innovación y Tecnología de Ecopetrol, y que a través de la cual evidenciamos las capacidades físicas y tecnológicas con las que cuentan las dos instituciones.

La experiencia en el desarrollo de proyectos conjuntos entre las dos instituciones, una educativa y la otra del segmento de la energía, nos permite hacer aportes significativos al conocimiento científico y tecnológico, para dar respuestas a las necesidades de nuestro entorno y convirtiéndose en una gran apuesta a emular para el desarrollo y competitividad de la región y del país.

Andrés Eduardo Mantilla Zárate
Director Instituto Colombiano del Petróleo,
Centro de Innovación y Tecnología de Ecopetrol.

Pbro. Gustavo Méndez Paredes
Rector Seccional Bucaramanga
Universidad Pontificia Bolivariana.



Introducción: nivel operacional

La necesidad de ser más competitivos ha obligado a que las empresas consideren la función de mantenimiento como un factor clave en el proceso de mejora de la eficacia técnica y de la eficiencia económica de sus procesos productivos [1]. Sin embargo, el concepto de la función de mantenimiento ha evolucionado de forma importante a lo largo de los últimos 70 años [2] [3].

La primera generación, años 40 y 50, su papel era reparar los equipos averiados, desarrollando técnicas de mantenimiento correctivo (MC). En la segunda generación, años 60 y 70, se concentran los esfuerzos en incrementar la disponibilidad de la planta, extender la vida de los equipos y reducir los costes, fundamentalmente incorporando técnicas de mantenimiento preventivo periódico por tiempo (MP-T), basados en la tasa de fallo de los equipos.

Sin embargo, el concepto de la función de mantenimiento tal como se conoce actualmente, aparece a partir de los años 90, con la tercera y cuarta generación. La tercera generación introduce técnicas de inspección en servicio (IS) y mantenimiento preventivo por condición (MP-C) como alternativa al (MP-T), y la cuarta generación introduce el mantenimiento predictivo (MD) a través del monitoreo continuo o periódico del estado de los equipos que, en buena medida, se utiliza para planificar el (MP-C).

De forma paralela se ha producido un incremento de la mecanización de las industrias con la presencia de un número importante de equipos en procesos productivos tecnológicamente complejos, que requieren una mayor infraestructura de mantenimiento en la empresa y en consecuencia el incremento en la complejidad de su planificación y gestión.

En este sentido, los nuevos retos que se plantean para dicha función de mantenimiento han hecho necesario desarrollar metodologías, entre las que se encuentran Análisis de Causa Raíz RCA (*Root Cause Analysis*), Análisis de Modo de Fallos, Efectos y Criticidad FMECA (*Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*) y el Mantenimiento Centrado en Fiabilidad RCM (*Reliability Centered Maintenance*), cuya finalidad es posibilitar el establecimiento de la política de mantenimiento más eficaz con la mayor eficiencia económica posible, de forma que sea capaz de asignar la proporción óptima de mantenimiento de equipos adaptada a sus características y que permita alcanzar las metas actuales de la empresa [4] [5] [6] [7] [8].

En particular, la metodología RCM fue desarrollada para el mantenimiento de la industria aeronáutica en Estados Unidos en la década de los 60. En 1984 *Electrical Power Research Institute* (EPRI) empieza a incorporar esta metodología a las Centrales Nucleares. Igualmente, otros sectores industriales (plantas bioenergéticas, cementeras, fundiciones, refinerías de petróleo, plantas de gas, centrales térmicas, etc.) han aplicado la metodología RCM. En todos los casos esta metodología ha dado muy buenos resultados en la asignación de actividades y personal, en el tiempo de operación de las instalaciones y en la reducción de costes de mantenimiento [9] [10] [2] [11], con reducciones que se sitúan alrededor de un 30 – 40% de horas hombre y coste de material y con un periodo de retorno de la inversión necesaria de alrededor de dos años.

En la actualidad, la implementación del RCM (en las industrias con demanda de tecnología media-alta), así como de otras similares como el Mantenimiento Productivo Total TPM (*Total Productive Management*), a pesar de perseguir el propósito de asignar la proporción presuntamente óptima de mantenimiento, en general no se desarrolla sobre la base científica técnica necesaria para que dicho proceso pueda ser llamado efectivamente "optimización". [12] [13] [14].

En la década de los 80 se habla de gestión del mantenimiento, en la década de los 90 se amplió el concepto a Gestión de Activos, para posteriormente hablar de forma más general de optimización bajo criterios de Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad, Seguridad e



Inspección RAMSI+C (*Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Inspectability and Costs*) de equipos productivos [15] [16] [17] [18] [19] [20]. El atributo de "Inspección" hace referencia a la necesidad de controlar el estado del sistema a través de la monitorización de las variables físicas representativas de la condición del equipo y la comparación de estas variables con valores que caracterizan el estado del equipo [21] [22] [23].

En este contexto, empieza a concebirse el mantenimiento como una función más de la industria que, como tal, debe contribuir a los propósitos empresariales, por lo que se habla de Mantenimiento Orientado a los Negocios o a la Competitividad, donde la optimización multicriterio, bajo criterios RAMSI+C, es fundamental para alcanzar metas tales como una elevada fiabilidad, disponibilidad, donde la seguridad con una adecuada inspección del proceso conlleve a una mayor productividad y calidad del producto, que sea respetuosa con el medio ambiente, además de ser efectiva al mínimo coste posible [24].

Esta requiere, en primer lugar, una formulación precisa del problema (establecer los objetivos y especificar cuantitativamente las metas y desarrollar los modelos, en este caso los criterios RAMSI+C). En segundo lugar, una estrategia de resolución del problema de optimización coherente con dicha formulación, que tenga en cuenta los múltiples objetivos a optimizar, (por ejemplo, la disponibilidad de los sistemas y la minimización del coste), donde se contemplen las restricciones (en las metas, en las estrategias de mantenimiento aplicables, en los recursos humanos y materiales, etc.) lo que facilita así la toma final de decisión.

Sin embargo, llevar a cabo el plan de mantenimiento requiere tener a disposición los recursos humanos y materiales, necesarios para ejecutar cada una de las actividades. Por tanto, es imprescindible tener en cuenta en la optimización de la función de mantenimiento, parámetros que permitan estimar el nivel de inventario óptimo de piezas de repuesto. Por lo cual, es necesario integrar modelos de inventario [25] [9] [26] [27] que permitan la asignación eficiente de los recursos materiales.

Desde el punto de vista de los recursos humanos, es indispensable incluir parámetros que permitan asignar la cantidad de personal necesario para realizar la actividad de forma eficiente y eficaz, permitiendo disminuir el tiempo de indisponibilidad del equipo con el mínimo coste [5] [9] [3]. Una vez obtenido e implantado el plan óptimo de mantenimiento, es necesario realizar la monitorización de las variables físicas representativas de la condición del equipo, y la comparación de estas variables con valores que caracterizan su estado, de manera que se pueda llevar a cabo un correcto control del estado del sistema [28] [29].

En la actualidad, el aumento en la complejidad de los procesos de la industria ha fomentado la creación de centros de investigación y desarrollo (Centro I+D) que apoyan el cumplimiento de los propósitos empresariales y la mejora de la calidad técnica de los diferentes procesos con base en la generación de nuevo conocimiento, el desarrollo y la absorción de tecnología [30]. Establecer un plan de mantenimiento en este tipo de contextos representa un reto para la toma de decisiones, teniendo en cuenta la diferencia que existe con los equipos de producción como lo son los tiempos de trabajo intermitente, maquinaria especializada, recurso humano escaso, repuestos y mano de obra especializada de difícil consecución y altos costos.

En particular, en el sector Oil&Gas, resulta determinante el diseño de nuevos procesos e innovaciones en el contexto *Upstream, midstream y downstream*, pruebas experimentales y desarrollo de ingenierías y productos tecnológicos. En este sentido, se requiere asegurar el buen funcionamiento de los equipos que constituyen tanto a las plantas piloto como los laboratorios. Por tal motivo, establecer un plan de mantenimiento que incluya el recurso humano, recurso material, minimizando los costos y maximizando los tiempos de disponibilidad de los equipos, se convierte en la meta del departamento de mantenimiento del Centro I+D.



Plan óptimo de mantenimiento para un Centro I+D

La percepción del servicio de mantenimiento llevado a cabo en un Centro I+D evidencia algunos retos que representan oportunidades de mejora en el proceso de planeación del mantenimiento basado en criterios de confiabilidad. Algunos problemas asociados con la fiabilidad de un sistema son: altos tiempos de inactividad producto del incremento en paradas, averías y fallas. Además de la indisponibilidad de equipo causada por la falta de recursos (humanos, herramientas y repuestos) para el desarrollo de las actividades de mantenimiento.

Para generar planes óptimos de mantenimiento, se requiere analizar los datos obtenidos de los históricos de los activos, desarrollar análisis de causa raíz a los eventos de falla y además la planeación de los recursos necesarios para la ejecución de la actividad de mantenimiento, minimizando así la indisponibilidad de los equipos.

En este contexto, se plantea para un Centro I+D una investigación a cuatro niveles: Nivel Instrumental, Nivel Operacional, Nivel Táctico y Nivel Estratégico. Los resultados del Nivel Instrumental se pueden consultar en la gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo [31]. Este libro presenta los resultados del Nivel Operacional organizado en cinco capítulos teniendo como objeto de estudio una planta piloto de procesos térmicos.

El capítulo uno y tres, contienen los modelos y análisis de fiabilidad de los sistemas asociados a una planta piloto. Estos estudios permiten comprender cómo los equipos se integran para cumplir con su función principal, además de su caracterización en términos de funcionalidad y reparabilidad.

En el capítulo dos se presenta la línea base de los planes de mantenimiento asociados a una planta piloto, cuyo aporte es dar a conocer los procesos de mantenimiento y controles que se realizan dentro de un Centro I+D.

En el capítulo cuatro se determina la cantidad óptima de recursos humanos y materiales necesarios para atender las órdenes de mantenimiento en la organización. En este capítulo se presenta una propuesta de las horas hombre, los materiales, equipos y/o herramientas necesarias para llevar a cabo los trabajos programados, formando parte importante de la planeación de la capacidad del mantenimiento para la planta piloto.

El capítulo cinco presenta una propuesta de escenarios para la ejecución del mantenimiento preventivo basado en la planificación, incluyendo los modelos matemáticos presentados en los capítulos precedentes en tres aspectos: comportamiento de las fallas (resultados capítulo uno y tres), costes (resultados capítulo cuatro), tiempo de ejecución de tareas de mantenimiento (resultados en los capítulos dos y cinco).

Maryory Patricia Villamizar León PhD.

Líder Técnico del Acuerdo de Cooperación UPB



Capítulo 1

Modelos de fiabilidad de una planta piloto de procesos térmicos



1.1 Introducción

Con el propósito de plantear un modelo de fiabilidad para la planta piloto de procesos térmicos de un Centro I+D es importante no solo considerar su función principal y modos de operación; sino también definir los sistemas que la componen y las características de los componentes que la constituyen desde la perspectiva de reparabilidad y fiabilidad. De esta manera es posible cuantificar, a partir de la teoría de la probabilidad, las métricas de fiabilidad que permiten evaluar la probabilidad de fallo en el funcionamiento de la planta y es información esencial para la evaluación de las estrategias de mantenimiento que hasta el momento se han implementado.

En esta sección, se presenta la función principal de la planta piloto y se determina la jerarquización de los sistemas, subsistemas, equipos y componentes que permiten su funcionamiento. Para cada uno de los equipos seleccionados en el estudio, se clasifican en reparable y no reparable; y se determina la función de probabilidad de la variable aleatoria seleccionada (tiempo hasta el fallo o tiempo entre fallos) teniendo en cuenta la disponibilidad de históricos de fallo registrados y la clasificación de acuerdo con su reparabilidad. Posteriormente, se evalúan las métricas más pertinentes para estudiar la fiabilidad de los equipos, para los intervalos de un semestre y un año. Finalmente, se consideran los gráficos de control para el análisis de variabilidad del tiempo entre fallos y se presentan los gráficos de control para los equipos de mayor incidencia en el fallo.

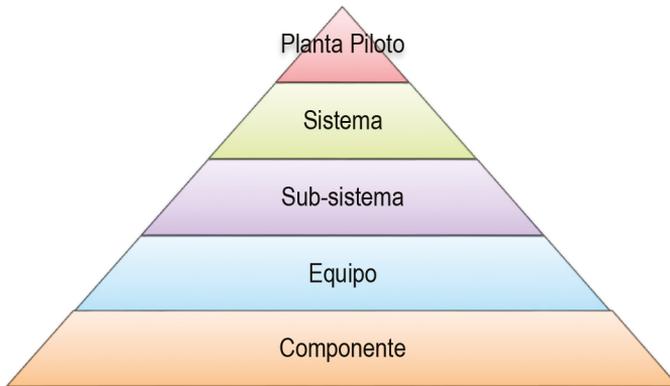
1.2 Planta piloto de procesos térmicos: sistemas y componentes

En primer lugar, se requiere definir la taxonomía que es considerada para el análisis de la planta piloto teniendo como referente la norma ISO 14224, donde se considera la jerarquía o grado de detalle. En particular, la norma proporciona 9 niveles de categorización, donde los niveles del 1 al 5 corresponden a una categoría que no relaciona las unidades de equipo, sino que tiene en cuenta la organización de industria (industria, categoría de negocio, instalación, planta, sec-

ción). Los niveles 6 al 9 corresponden a una subdivisión de equipos (unidad de equipo, subunidad, componente, parte) [32].

En la Figura 1 se presentan los niveles de jerarquización contemplada para el análisis del caso en estudio; siendo la jerarquía más alta la planta piloto y la más baja el componente. En particular, se tiene especial interés de cuantificar las métricas de fiabilidad individuales que serán determinantes en el cálculo de la fiabilidad total de la planta piloto.

Figura 1. Jerarquización de la planta piloto de procesos térmicos.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 están las definiciones para identificar cada uno de los niveles jerárquicos de la taxonomía conforme a la norma ISO 14224 [32].

Para la jerarquización fueron tenidos en cuenta los Standards JOBS y AMEF, formatos establecidos por el Centro I+D, además de documentos técnicos específicos de la planta piloto, tales como P&ID, etc. La integración de esta información y el apoyo del líder de la planta permitió delimitar los sistemas y establecer las funciones de los mismos; además de clasificar los componentes de los equipos



en no reparables y reparables siguiendo las normas UNE-EN-13306 y UNE-EN-61703 [34] [35], las hipótesis que los identifican.

Recordando que los componentes no reparables son aquellos que bien por su naturaleza o porque es más económico o seguro reemplazarlos o reciclarlos no son sometidos a reparación alguna [36]; mientras que los componentes reparables son aquellos en los que todas o algunas de las partes son susceptibles de ser sometidas a reparación [37].

Tabla 1. Definición de los niveles de las jerarquías

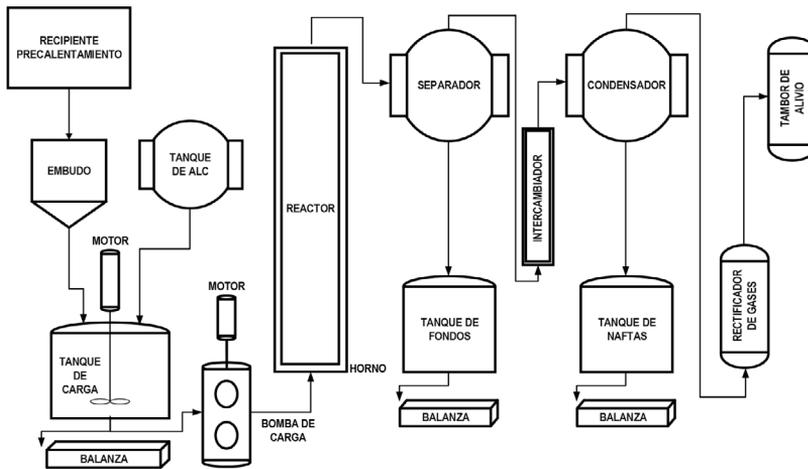
Niveles	Definición
Planta	El grupo de sistemas que funcionan conjuntamente para suministrar una salida o producto, mediante el proceso y manipulación de una materia prima o elementos almacenados [32].
Sistema	En el contexto de confiabilidad se considera un sistema un grupo de subsistemas que desarrollan una serie de funciones clave, que pueden resumirse como una función principal que requiere una planta, teniendo un propósito definido que se expresa en términos de funciones requeridas y condiciones establecidas para su uso u operación. Por ejemplo, licuefacción, gasóleo al vacío, sección de oxidación, sistema de reacción [32].
Subsistema	Un subsistema son aquellos equipos que posibilitan que el sistema pueda realizar su función operativa y se obtenga una división de sus funciones específicas [33]. La norma ISO 14224 no define los subsistemas.
Equipo	Se define equipo como un grupo de componentes que forman un conjunto identificable, realizando como mínimo una función importante, por sí solo. Por ejemplo, intercambiador de calor, compresores, turbinas de gas [32].
Componente	Un componente se denomina a un servicio o producto que se modela en forma global. También se define como la parte de los equipos sobre las cuales son necesario realizar una acción de mantenimiento. Según la norma ISO 14224, un componente es "el menor nivel al cual un equipo puede ser desensamblado sin que se le causa daño". Por ejemplo, válvula, sensor de temperatura, motor, acoplamiento [32].

Fuente: Elaboración propia.

1.3 Jerarquización de la planta piloto de procesos térmicos

La planta piloto está diseñada para reducir la viscosidad de los fondos de destilación atmosféricos, fondos de vacío, fondos Demex o crudo reducido, por medio de craqueo térmico. En la Figura 2 se presenta el esquema general de la planta piloto.

Figura 2. Esquema planta piloto de procesos térmicos



Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del análisis para la jerarquización de la planta piloto (Ver Figura 1), fundamentando la delimitación de los sistemas en la función que desempeñan para favorecer el cumplimiento de la función principal; se definieron los siguientes sistemas:

- **Sistema de aire de instrumentación:** se encarga de suministrar el aire requerido para el funcionamiento de la instrumentación de la planta.



- **Sistema de nitrógeno:** se encarga de suministrar nitrógeno a los diferentes sistemas que lo requieran que, en estos momentos, según la operación de la planta, son tres sistemas.
- **Sistema de limpieza:** la función de este sistema es limpiar minuciosamente toda la planta para que quede lista para los distintos modos de operación y así evitar riesgos de reacciones químicas peligrosas.
- **Sistema de carga:** la función es el precalentamiento, fusión y la carga de productos para ser enviadas al reactor. *"Se realiza cambio de estado de la carga sólida a líquida a partir de calentamiento hasta punto de fluidez y homogenización de la misma en los tanques de carga mediante agitación, posteriormente la carga es enviada por medio de la bomba de carga al horno-reactor"* [38]. Este sistema está constituido por dos subsistemas.
- **Sistema de reacción:** la función del sistema de reacción es realizar la viscorreducción, oxidación o pirolisis. *"Se lleva a cabo la reacción de la carga homogenizada en el horno-reactor previamente calentado a la temperatura de reacción, teniendo en cuenta, la severidad deseada por temperatura y tiempo de residencia. La velocidad de flujo proporcionada por la bomba de carga y el recorrido de la carga dentro del reactor, permite trabajar a diferentes tiempos de residencia en el reactor. Los productos de la reacción salen por la cima del reactor y pasan al separador"* [38].
- **Sistema de separación:** la función del sistema de separación es separar la fase gaseosa de la líquida, ambas generadas en la reacción. *"En el tambor se proporciona el calor necesario para la separación por vaporización instantánea de una corriente liviana compuesta por nafta y gases y de una corriente pesada compuesta por gasóleos y fondos viscorreducidos. La corriente pesada es almacenada en los tanques de fondos. La corriente liviana es enviada a la sección de condensación"* [38].
- **Sistema de condensación:** su función es condensar la nafta, incluyendo un reproceso hasta finalmente lograr el objetivo. "Se

enfria la corriente liviana en el intercambiador de calor y la nafta es condensada. La nafta se almacena en tanques, los gases residuales son enviados al sistema de gases residuales, pasando previamente por el tambor de alivio" [38].

- **Sistema de recolección:** realizar una medición y disposición de los productos de separación y condensación y asegurar sus parámetros de calidad. Este sistema está constituido por dos subsistemas.
- **Sistema de alivio de presión:** en este sistema se encuentran todas las válvulas de seguridad, cuya función es proteger equipos en las diferentes zonas de la planta.

Para definir los elementos reparables y no reparables asociados a la función principal del equipo, se trabajaron tres aspectos: la taxonomía ISO 14224, las definiciones establecidas en las normas UNE y las hipótesis que los identifican. En la Tabla 2 se presentan los equipos, componentes y clasificación de acuerdo con su reparabilidad.

Tabla 2. Componentes de los equipos de la planta piloto y clasificación según su reparabilidad

Equipo	Componente	Reparable / No reparable
Sistema de carga		
	Transmisor de temperatura TT-38	No reparable
	Transmisor de temperatura TT-34	No reparable
Tanque de carga K-01	Tanque 6 galones Stainless Steel, 316	No reparable
	Agitador Tipo Cinta Stainless Steel, 316	Reparable
	Conector Macho 1/2" NPT x 1/4" OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Lamina Superior Manta Stainless Steel, 316	Reparable
	Sello Superior Manta Silicone	No reparable
	Abrazadera para Flange \varnothing 2" Stainless Steel, 304	No reparable
	Tapón Flange Tubería Sanitaria 2" Stainless Steel, 304	No reparable
	Mezclador 1/10 HP – Cole Parmer Aluminio 1060	Reparable
	Banda Resistencia Eléctrica 10" x 4" Acero inoxidable, 316	No reparable
Balanza W-01	Balanza	Reparable

Continúa...



Continuación

Equipo	Componente	Reparable / No reparable
Embudo de carga EM-01	Resistencia tubular TIC-40	No reparable
	Transductor de presión swagelok PT-01	No reparable
	Resorte spring	No reparable
Agitador magnético 1700 rpm AGT-01	Magneto	No reparable
	Rodamientos	No reparable
Agitador magnético 2200 rpm AGT-02	Magneto	No reparable
	Rodamientos	No reparable
	Válvula de alivio Dresser Consolidated PSV-02	Reparable
	Resorte spring	No reparable
Bomba de carga P-01	Transmisor de temperatura para medir tracing TT-03	Reparable
	Motor M-01	Reparable
	Reductor	Reparable
	Cabeza de la bomba	Reparable
	Engranajes (cabeza)	No reparable
	Variador de frecuencia	Reparable
Tanque de almacenamiento de ALC K-14	Resistencia tubular (cabeza) TT-12	No reparable
	Lámina Superior Manta Stainless Steel, 304	Reparable
	Sello Superior Manta Silicone	No reparable
	Manta de calentamiento – Recipiente \varnothing 10" Stainless Steel, 304	Reparable
	Tapón Flange Tubería Sanitaria \varnothing 2" Stainless Steel, 304	No reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	RTD-L250mm 1	No reparable
	Banda Resistencia Eléctrica \varnothing 10" x 4" Acero inoxidable, 316	No reparable
Abrazadera para Flange \varnothing 2" Stainless Steel, 304	No reparable	
Bomba de adición de aditivos P-02	Pistón	No reparable
Sistema de reacción		
Reactor R-01	Reactor tubular; SS316; 1/2" OD 0.049"	No reparable
	Tee; SS316; 1/2" OD	No reparable
	Reductor; SS316 3/8" OD x 1/2" OD	No reparable
	Conector SS316 3/8" OD x 3/8" OD	No reparable
	Indicador de presión diferencial PDIT-01	Reparable
	Válvula cheque de Bola on-off (2-way) swagelok CK-66	Reparable
	Válvula de bola de 3 piezas swagelok 1/2 EV-66	Reparable
	Manómetro	No reparable
	Controlador indicador de temperatura de piel TIC-12 TT	Reparable
	Controlador indicador de temperatura de piel TIC-13 TT	Reparable
	Controlador indicador de temperatura de piel TIC-14 TT	Reparable
	Transmisor de presión PT-19	Reparable
	Indicador de presión PI-29	No reparable

Continúa...

34 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

Continuación

Equipo	Componente	Reparable / No reparable
Sistema de separación		
Tanque de fondos K-05	Tanque 6 galones Stainless Steel, 316	Reparable
	Lamina Superior Manta Stainless Steel, 316	Reparable
	Conector Macho 1/2" NPT x 1/4" OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Manta de calentamiento – Recipiente \varnothing 10" Stainless Steel, 304	Reparable
	Sello Superior Manta 3.5 gal Silicone	No reparable
	Abrazadera para Flange \varnothing 2" Stainless Steel, 304	No reparable
	Válvula de bola \varnothing 1/2" OD	No reparable
Banda Resistencia Eléctrica	No reparable	
Balanza W-03	Balanza	Reparable
Tanque de fondos K-06	Tanque 6 galones Stainless Steel, 316	Reparable
	Lamina Superior Manta Stainless Steel, 316	Reparable
	Conector Macho 1/2" NPT x 1/4" OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Manta de calentamiento – Recipiente \varnothing 10" Stainless Steel, 304	Reparable
	Sello Superior Manta 3.5 gal Silicone	No reparable
	Abrazadera para Flange \varnothing 2" Stainless Steel, 304	No reparable
	Válvula de bola \varnothing 1/2" OD	No reparable
Banda Resistencia Eléctrica	No reparable	
Tambor separador D-04	Sensor por diferencial de presión	No reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Aislamiento Separador Stainless Steel, 316	No reparable
	Banda Resistencia Eléctrica \varnothing 1.9" x 2 pulg Acero inoxidable, 316	No reparable
	Banda Resistencia Eléctrica \varnothing 5.5" x 2 pulg Acero inoxidable, 316	No reparable
	Base separador Stainless Steel, 304	Reparable
Sistema de Condensación		
Intercambiador de calor E-01	Carcasa de 3" OD SS316 Espesor 3mm	Reparable
	Tubbing material 316 1/4" OD Espesor 0.0049"	No reparable
	Conector 1" NPT x 1/2" OD material SS316	No reparable

Continúa...



Continuación

Equipo	Componente	Reparable / No reparable
Condensador D-07	Aislamiento Separador Stainless Steel 316	No reparable
	Base Separador Stainless Steel 304	Reparable
	Tubbing condensador $\varnothing_w 1/2"$	No reparable
	Aislamiento inferior NAFTA S	No reparable
	Aislamiento principal NAFTA S	No reparable
	Aislamiento superior NAFTA S	No reparable
	Sensor Nivel VEGAFLEX 61	No reparable
	Camisa superior condensador	Reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Camisa de Enfriamiento Stainless Steel, 316	Reparable
	Controlador de nivel de líquido LT-02	Reparable
	Transmisor de temperatura interna TT-31	Reparable
Tambor rectificador de gases D-08	Aislamiento Separador Stainless Steel 316	No reparable
	Base Separador Stainless Steel 304	Reparable
	Tubbing condensador $\varnothing 1/2"$	No reparable
	Aislamiento inferior NAFTA S	No reparable
	Aislamiento principal NAFTA S	No reparable
	Aislamiento superior NAFTA S	No reparable
	Camisa superior condensador	Reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Camisa de Enfriamiento Stainless Steel, 316	Reparable
Baño de enfriamiento E-02	Tarjeta de control	No reparable
	Display de control	No reparable
	Unidad de enfriamiento	Reparable
	Colector	Reparable
	Adaptadores de manguera	No reparable
Tanque de Nafta K-09	Plato de aislamiento Stainless Steel	Reparable
	Tapa Aislamiento Polyurethane	No reparable
	Cuerpo Aislamiento Polyurethane	No reparable
	Conector Macho 1/2" NPT x 1/4" OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Conector Macho 1-2 NPT x 1-2 OD Stainless Steel, 316	No reparable
	Camisa de Enfriamiento Recipiente $\varnothing 5"$ Steel, 316	Reparable
	Base recipiente $\varnothing 5"$ Stainless Steel, 316	Reparable
Tanque auxiliar de Nafta K-10	Transmisor de temperatura TT-34	No reparable
	Tanque de carga	Reparable
	Conector 1-2 NPT x 1-2 OD	No reparable
	Conector Hembra 1/4" FNPT SS316	No reparable

Continúa...

36 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

Continuación

Equipo	Componente	Reparable / No reparable
Tambor de alivio D-11	Conexión O11,9 – 10,2 Prof. Y Roscado 1/4-18 NPT – 10 Prof	No reparable
	Conexión O12 – 10,2 Prof. Y Roscado 1/4-18 NPT – 10 Prof	No reparable
	Rosca para sujeción O38.1 pasante y roscado 1 1/2-6 UNC	No reparable
	Tanque 1 Galón	Reparable
	Válvula de alineación HV-70 NV28	Reparable
Otros		
Gabinete de control y potencia		Reparable
Balanza Electrónica		Reparable
Bomba de engranajes		Reparable
Controlador de flujo másico	Electroválvulas solenoide Asco Mpc	Reparable
Filtro de remoción de aceite 3/8"	Elemento filtrante	No reparable
Horno de calentamiento	Cerámica refractaria	Reparable
	Manómetro 0-400 psi	No reparable
Medidor de flujo másico tipo Coriolis	Válvula de seguridad PSV-04	No reparable
	Válvula de seguridad PSV-05	No reparable
	Válvula de seguridad PSV-06	No reparable
	Válvula de seguridad PSV-07	No reparable
	Válvula de seguridad PSV-08	No reparable
	Válvula de seguridad PSV-09	No reparable
	Reactor Nacional 60 Cm, Diámetro 1/2"	No reparable
	Regulador de presión de flujo	Reparable
	Regulador de presión Smc con rosca	Reparable
	Resistencia de banda aislada	No reparable
Sistema de control y supervisión	Termocupla Tipo K	No reparable
	Termopar Watlow Mod Aw	No reparable
	Válvula solenoide 5/2 de conexión 1/4"	No reparable

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

Los hallazgos en la jerarquización se pueden resumir en la Tabla 3. Para el caso de la clasificación de reparable y no reparable han sido analizados tanto equipos como componentes.



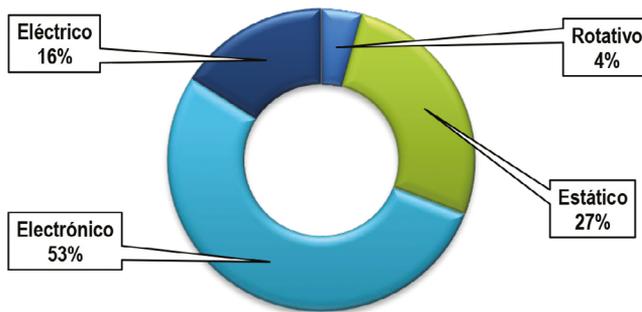
Tabla 3. Resultados de la jerarquización de los equipos de la planta piloto

Sistemas	Subsistemas	Equipos	Componentes	Reparables	No reparable
9	4	94	363	178	219

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

Adicionalmente, para la caracterización de los equipos de la planta piloto, se tuvo en cuenta el tipo de equipo, de acuerdo con su funcionamiento. Esta clasificación está dada en rotativo, estático, electrónico y eléctrico (ver Figura 3). Se resalta que el 53% de los equipos es del tipo electrónico, mientras que el 4% de los equipos es del tipo rotativo.

Figura 3. Clasificación de los equipos pertenecientes a la planta piloto



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

1.4 Variables aleatorias y métricas

Con el propósito de realizar el análisis probabilístico de la fiabilidad, la variable aleatoria de interés seleccionada corresponde al tiempo de funcionamiento hasta el fallo del equipo; que corresponde al tiempo transcurrido desde el instante en el que se pone en operación hasta que esta falla por primera vez. Las métricas de fiabilidad que se consideraron se obtuvieron de la norma UNE-EN-61703 [35], donde

se formalizan las expresiones matemáticas para la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y soporte de mantenimiento tanto para el caso reparable como no reparable. En particular, para el análisis de la planta piloto fueron consideradas las siguientes expresiones:

- Función de fiabilidad (supervivencia) $R(t)$ corresponde a la probabilidad de supervivencia hasta el instante t .

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde $f(t)$ corresponde a la función de densidad de probabilidad del tiempo de funcionamiento hasta el fallo, la cual se establece a partir de la naturaleza del equipo que está siendo estudiado.

- Tasa instantánea de fallo $z(t)$

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Tiempo medio hasta el fallo (*Mean Time to Failure*, $MTTF$) definido para los componentes no reparables

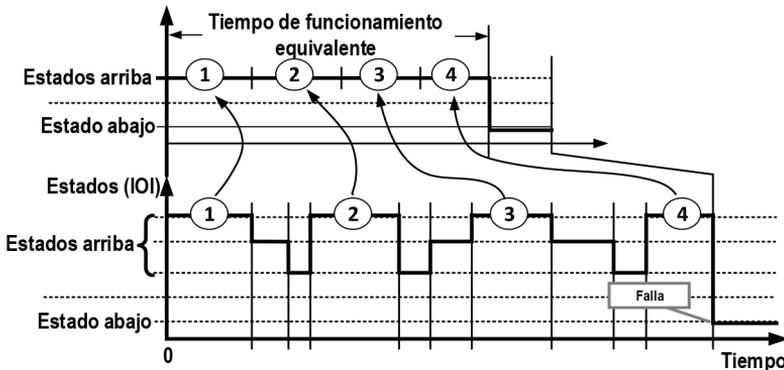
$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad \text{Ecuación 3}$$

En el caso de los componentes reparables, el *tiempo medio de funcionamiento entre fallos* ($MTBF$ *Mean Time Between Failures*) resulta ser la variable aleatoria de interés. Sin embargo, en el caso de estudio, se ha considerado que el tiempo requerido para la reparación o reemplazo de un componente en falla es muy pequeño en comparación con $MTTF$, de modo que se considera que el tiempo de reparación es despreciable y por tal motivo, es válida la igualdad entre $MTBF$ y $MTTF$ [40].



Es importante resaltar que las expresiones para las medidas de fiabilidad de componentes reparables de operación continua podrían no ser válidas para componentes individuales que operan de manera intermitente. Sin embargo, cuando se supone que el componente no puede fallar cuando no está en estado operativo, las expresiones permanecen válidas siempre y cuando el tiempo operativo se utilice de acuerdo con la representación de la Figura 4. Si los componentes fallan durante estados no operativos, procesos estocásticos generales tendrán que ser considerados [35].

Figura 4. Tiempo de operación equivalente para artículos IOI



Fuente: Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad [35].

Posterior a la selección de las variables aleatorias de interés, resulta determinante establecer $f(t)$ para cada uno de los equipos que resulte más pertinente, teniendo en cuenta las características de funcionamiento del mismo. Las distribuciones contempladas en este estudio son las siguientes:

- **Distribución exponencial:** se caracteriza por el parámetro λ , que corresponde a la tasa de falla constante e independiente del tiempo.

- **Distribución Gamma:** se caracteriza por los parámetros de escala ($\theta = 1/\lambda$) y de forma (α). Es apropiada para casos donde pueden existir fallas parciales y donde un número de fallas parciales ocurre antes de que el equipo falle.
- **Distribución Weibull:** se caracteriza por los parámetros de escala (θ) y de forma (α). Es una distribución bastante flexible ya que permite modelar varios tipos de comportamientos de la tasa de falla realizando la selección apropiada de los parámetros. En particular, si $\alpha = 1$, la distribución Weibull coincide con la distribución exponencial, siendo $z(t)$ una constante igual a $1/\theta$.

En la Tabla 4 se presentan las expresiones matemáticas para $f(t)$, $R(t)$, $z(t)$, $MTTF$ y la varianza, obtenidas para funciones de distribución de probabilidad seleccionadas, teniendo en cuenta que en todos los casos el tiempo $t \geq 0$ [40].

Tabla 4. Resumen de expresiones matemáticas para la fiabilidad por diferentes funciones de distribución de probabilidad

Ley de distrib.	$f(t)$	$R(t)$	$z(t)$	MTTF	Varianza
Exponencial	$\lambda \exp(-\lambda t)$ $\lambda > 0$	$\exp(-\lambda t)$	λ	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
Weibull	$\frac{\alpha}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha\right]$ $\theta > 0, \alpha > 0$	$\exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\alpha\right]$	$\frac{\alpha}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\alpha-1}$	$\theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	$\theta^2 \left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right)$
Gamma	$\frac{\beta(\beta t)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\beta t)$ $\alpha > 0, \beta > 0$	$\int_t^\infty f(u) du$	$\frac{f(t)}{R(t)}$	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{\alpha}{\beta^2}$

$r(x)$ es la función gamma completa definida de la forma $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt, x > 0$

Fuente: Para mayor detalle consultar expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad [35].



1.5 Caracterización probabilística de la fiabilidad para los equipos de la planta piloto

Para determinar la distribución $f(t)$ y estimar sus parámetros es importante contar con información detallada de los eventos de fallo del equipo, teniendo en cuenta que el número de muestras debe ser suficiente para alcanzar el nivel de significancia estadística requerida para validar los resultados. En el caso de estudio, se destaca que las funciones que cumple la planta piloto están orientadas a actividades de investigación y desarrollo, de manera que el tiempo de operación no es continuo y por tal motivo los eventos de falla se reducen drásticamente en comparación con lo que podría acontecer con una planta de producción. En particular, después de una revisión de los diferentes softwares de planificación del Centro I+D, tales como SAP y Ellipse, se encontró que el 11.32% de los equipos cuenta con por lo menos un evento de fallo registrado, mientras que el 88.68% de los equipos no presenta ningún evento. Ante este panorama, se han considerado las siguientes estrategias para calcular $f(t)$ en función de la información encontrada en los históricos de falla:

- En caso que se cuente con la cantidad suficiente de datos se podrá aplicar ajustes a distribuciones programadas en R.
- En caso de obtener pocos datos en la revisión de históricos se podrá trabajar con OREDA como fuente genérica y a través del procedimiento BaSiano se particularizará para el contexto.
- En caso que se cuente con la cantidad suficiente de datos se podrá aplicar el análisis Weibull; para esto se tendrá en cuenta la norma UNE-EN-61649 [41].

1.5.1 Base de datos OREDA 2015

En la base de datos OREDA [42] (The Offshore and Onshore Reliability Data) se han recolectado y analizado datos del mantenimiento y

de la operación de equipos relacionados con el sector Oil & Gas, que contribuyen al mejoramiento de la fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad que son de interés para las compañías, los empleados y las autoridades.

Es importante resaltar que debido a que los equipos se consideran en el tiempo de vida útil, se supone la tasa de falla como constante e independiente del tiempo. Adicionalmente, al considerar que los datos reportados fueron obtenidos de diferentes instalaciones, es necesario contemplar la mezcla de distribuciones exponenciales para el manejo de esta muestra no homogénea. Bajo estas condiciones, se supone la tasa de falla como una variable aleatoria caracterizada por una distribución Gamma.

$$\pi(\lambda) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda} \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo los parámetros de escala $\hat{\alpha}$ y de forma $\hat{\beta}$ calculados por:

$$\hat{\beta} = \frac{\theta^*}{\hat{\sigma}^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\hat{\alpha} = \hat{\beta} * \theta^* \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde, θ^* corresponde a la estimación final del promedio de la tasa de fallo, "Mean" (columna 4 en OREDA) y $\hat{\sigma}^2$ corresponde a la estimación varianza que se obtiene a partir de desviación estándar, es decir, $SD = \hat{\sigma}$ (columna 6 en OREDA).

Lo anterior conduce a las siguientes expresiones para la densidad de probabilidad del tiempo al fallo $f(t)$, la fiabilidad $R(t)$, el tiempo promedio hasta el fallo MTTF y la función de la tasa de fallo $z(t)$:

$$f(t) = \frac{\alpha\beta^\alpha}{(\beta + t)^{\alpha+1}} \quad \text{Ecuación 7}$$



$$R(t) = \left(1 + \frac{t}{\beta}\right)^{-\alpha} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$MTTF = \frac{\beta}{\alpha-1} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$z(t) = \frac{\alpha}{\beta + t} \quad \text{Ecuación 10}$$

1.5.2 Consolidación de resultados para los equipos de la planta piloto

Teniendo en cuenta las estrategias anteriormente mencionadas de acuerdo con el número de datos, en la Tabla 5 se presentan $f(t)$ con sus respectivos parámetros y la fuente de donde se obtuvieron. En particular, se destaca que en ninguno de los casos se contó con el número de fallos suficiente para realizar la inferencia $f(t)$. En la Tabla 6, se reportan las tasas de falla $z(t)$ y la fiabilidad $R(t)$ en el intervalo de 6 meses y un año para los equipos que presentan información insuficiente en los históricos del Centro I+D. Para equipos que no se encuentran reportados en OREDA [42], fue necesario utilizar la información reportada por Creus [43] y Barringer [44].

Tabla 5. Distribuciones de probabilidad para los equipos de la planta piloto

Equipo	Distribución	Fuente	Parámetro Forma	Parámetro Escala
Bomba desplazamiento positivo	Gamma	OREDA pág. 164	0.49983	6.00998
Baño de enfriamiento	Gamma	OREDA pág. 260	1.99738	4.36570
Válvula de control de presión	Gamma	OREDA pág. 489	2.00020	1.97980
Válvula de seguridad	Gamma	OREDA pág. 512	1.39500	4.30107
Tanque de almacenamiento para Alc	Gamma	OREDA pág. 306	4.04178	0.04775
Tanque de precalentamiento	Gamma	OREDA pág. 306	4.04178	0.04775
Tanque de carga	Gamma	OREDA pág. 306	4.04178	0.04775

Continúa...

44 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

Continuación

Equipo	Distribución	Fuente	Parámetro Forma	Parámetro Escala
Tanque de fondos	Gamma	OREDA pág. 306	4.04178	0.04775
Rectificador de nafta	Gamma	OREDA pág. 306	4.04178	0.04775
Tanque de nafta	Gamma	OREDA pág. 306	4.04178	0.04775
Tambor de alivio	Gamma	OREDA pág. 306	4.04178	0.04775
Separador	Gamma	OREDA pág. 336	8.99851	1.34344
Tambor condensador	Gamma	OREDA pág. 346	1.00000	2.68599
Intercambiador	Gamma	OREDA pág. 296	12.42630	8.93026
Horno	Gamma	OREDA pág. 358	1.00000	1.12600
Motor agitador	Gamma	OREDA pág. 239	2.16744	0.02445
Motor	Gamma	OREDA pág. 266	0.49994	2.88233
Electroválvula	Exponencial	Creus pág. 432	1.6000	N/A
Diferencial de presión	Exponencial	Creus pág. 432	0.5710	N/A
Transmisor de nivel	Weibull	Barringer	1.0000	1.50000e10
Balanza	Exponencial	Método chi cuadrado	8.54951	N/A
Reactor	Weibull	Barringer	1.50000	2.00000e11
Termocupla	Exponencial	Creus pág. 432	5.70776e-5	N/A
Relé	Exponencial	Creus pág. 432	2.00000e-5	N/A

Fuente: Elaborado a partir de OREDA [42], Creus [43], Barringer [44] y citado en Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

Tabla 6. Métricas de fiabilidad para los equipos de la planta piloto para un semestre y un año.

Equipo	Semestral [horas]	Anual [horas]	R(t) Semestral %	R(t) Anual %
Bomba desplazamiento positivo	2.37802	1.96793	88.98	80.94
Baño de enfriamiento	0.85564	0.83988	96.29	92.78
Válvula de control de presión	3.64401	3.37472	84.68	72.62
Válvula de Seguridad	0.58890	0.57821	97.43	94.97
Tanque de Almacenamiento	0.19260	0.19220	99.16	98.33
Tanque de precalentamiento	0.19260	0.19220	99.16	98.33
Tanque de carga	0.19260	0.19220	99.16	98.33

Continúa...



Continuación

Equipo	Semestral [horas]	Anual [horas]	R(t) Semestral %	R(t) Anual %
Tanque de fondos	0.19260	0.19220	99.16	98.33
Rectificador de nafta	0.19260	0.19220	99.16	98.33
Tanque de nafta	0.19260	0.19220	99.16	98.33
Tambor de alivio	0.19260	0.19220	99.16	98.33
Separador	11.4172	10.8161	59.78	36.75
Tambor condensador	10.6793	10.2919	62.08	39.22
Intercambiador	10.6793	10.2919	62.08	39.22
Horno	1.07308	1.02491	95.30	91.02
Motor agitador	4.05738	3.78201	83.15	70.04
Motor	1.27947	1.15051	94.23	89.36
Electroválvula	1.60000	1.60000	93.23	86.92
Diferencial de presión	0.57100	0.57100	97.53	95.12
Transmisor de nivel	0.66667	0.66667	97.12	94.33
Balanza	8.54951	8.54951	68.77	47.29
Reactor	0.00351	0.00496	99.99	99.97
Termocupla	5.70776	5.70776	77.88	77.88
Relé	2.00000	2.00000	91.61	91.61

Fuente: Elaborado a partir de OREDA [42], Creus [43], Barringer [44] y citado en Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

Se resalta que los lazos de control de temperatura se componen por un relé y una termocupla. Para el caso de los lazos de control, se encontraron dos configuraciones posibles; en una se cuenta con una electroválvula y un transmisor de nivel, mientras que la otra se compone de una electroválvula y un transmisor de presión.

Para cuantificar la fiabilidad de cada uno de los lazos de temperatura y/o control, se realiza el producto de la fiabilidad de los componentes.

En la Tabla 7, se presentan los modos de falla seleccionados para los equipos encontrados en OREDA [42]. En este caso se seleccio-

naron aquellos modos de falla reportados en los históricos para los equipos, o los más comunes, de acuerdo con la experiencia del líder de la planta.

En la Tabla 8 se mencionan aquellos modos de falla a los que hace referencia 'todos los modos'. En los casos donde la información se tomó de otras fuentes, no fue posible establecer el modo de fallo de forma explícita.

Tabla 7. Modos de falla

Equipo	Modo de falla
Balanza	No encontrado en bases de datos
Bomba centrífuga	Todos los modos *
Baño de enfriamiento	Degradado
Reactor	No encontrado en base de datos
Válvula de control de presión	Todos los modos *
Válvula de seguridad	Todos los modos *
Tanque de almacenamiento	Otro
Separador	Lectura anormal del instrumento
Tambor condensador	Todos los modos *
Intercambiador	Todos los modos *
Motor agitador	Deficiencia estructural
Motor	Todos los modos *
Electroválvula	No especificado en base de datos
Horno	Transferencia de calor insuficiente

Fuente: Elaborado a partir de OREDA [42].

En la Tabla 8 se presentan los modos de falla reportados en OREDA 2015 para algunos equipos que componen la planta piloto.



Tabla 8. Modos de fallo genéricos OREDA 2015

Tanques	Horno	Bomba	Motor eléctrico	Inter-cambiador	Válvulas
AIR Lectura anormal del instrumento	AIR Lectura anormal del instrumento	AIR Lectura anormal del instrumento	AIR Lectura anormal del instrumento	AIR Lectura anormal del instrumento	AIR Lectura anormal del instrumento
ELP Fuga externa medio de proceso	ELP Fuga externa medio de proceso	BRD Desglose	BRD Desglose	ELP Fuga externa medio de proceso	DOP Operación retrasada
ELU Medio de utilidad de fuga externa	ELU Medio de utilidad de fuga externa	ERO Salida errática	ERO Salida errática	ELU Medio de utilidad de fuga externa	ELP Fuga externa medio de proceso
SER Problemas menores en servicio	IHT Transferencia de calor insuficiente	ELP Fuga externa medio de proceso	ELU Medio de utilidad de fuga externa	IHT Transferencia de calor insuficiente	ELU Medio de utilidad de fuga externa
OTH Otros	INL Fuga interna	ELU Medio de utilidad de fuga externa	FTS No se inicia bajo demanda	INL Fuga interna	FTC no cierra bajo demanda
PDE Desviación del parámetro	SER Problemas menores en servicio	FTS No se inicia bajo demanda	STP No se detiene bajo demanda	SER Problemas menores en servicio	FTO No se abre bajo demanda
PLU Obstruido	OTH Otros	STP No se detiene bajo demanda	LOO Salida baja	OTH Otros	FTR No se regula
STD Deficiencia estructural	OHE Sobrecalentamiento	HIO Alto rendimiento	SER Problemas menores en servicio	PDE Desviación del parámetro	HIO Alto rendimiento
UNK Desconocido	PDE Desviación del parámetro	INL Fuga interna	NOI Ruido	PLU Obstruido	INL Fugas internas
	PLU Obstruido	LOO Salida baja	OTH Otros	STD Deficiencia estructural	LOO Salida baja
	STD Deficiencia estructural	SER Problemas menores en servicio	OHE Sobrecalentamiento	UNK Desconocido	SER Problemas menores en servicio
		NOI Ruido	PDE Desviación del parámetro		OTH Otros
		OTH Otros	UST Parada espuria		PLU Obstruido
		OHE Sobrecalentamiento	STD Deficiencia estructural		SPO Operación espuria
		PDE Desviación del parámetro	UNK Desconocido		STD Deficiencia estructural
		UST Parada espuria	VIB Vibración		UNK Desconocido

Continuación

Tanques	Horno	Bomba	Motor eléctrico	Inter-cambiador	Válvulas
		STD Deficiencia estructural			LCP Fuga de la válvula en posición cerrada
		UNK Desconocido			
		VIB Vibración			

Fuente: Elaborado a partir de OREDA [42].

De los resultados obtenidos para las tasas de fallo de los equipos analizados, se encuentra que el equipo que presenta la mayor tasa de falla en seis meses (un año) es el separador con 11.4172×10^{-5} fallas/hr (10.8161×10^{-5} fallas/hr), seguido por el intercambiador y el tambor condensador con 10.6793×10^{-5} fallas/hr (10.2919×10^{-5} fallas/hr). Se destaca que para estos equipos se encontró la menor fiabilidad de la planta, detectando para el separador que en seis meses (un año) se tiene 59.78% (36.75%); mientras que para el intercambiador y el tambor condensador se tiene 62.08% (39.22%).

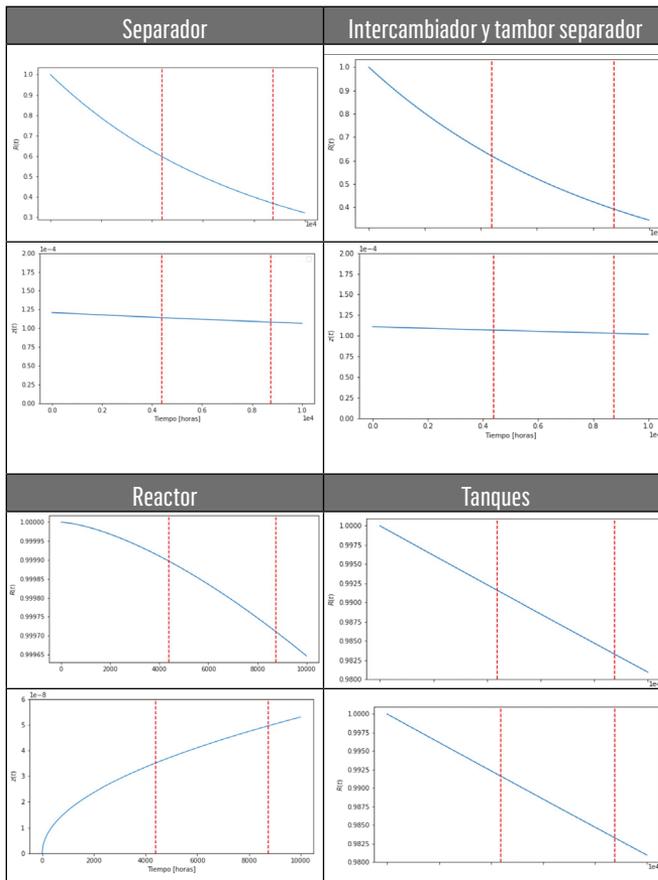
Por otra parte, el equipo que presenta la menor tasa de falla en seis meses (un año) es el reactor con 0.00351×10^{-5} fallas/hr (0.00496×10^{-5} fallas/hr) seguido por los tanques con 0.19260×10^{-5} fallas/hr (0.19220×10^{-5} fallas/hr). En este caso, se destaca que estos equipos presentan la mayor fiabilidad de la planta, obteniendo para el reactor que en seis meses (un año) se tiene 99.99% (99.97); mientras que para los tanques se tiene 99.16% (98.33%).

En la Tabla 9 se presentan $R(t)$ y $z(t)$ para el separador, intercambiador y tambor condensador los cuales presentan los resultados de menor fiabilidad; que se contrastan con los gráficos del reactor y los tanques identificados como los equipos de mayor fiabilidad. Vale la pena resaltar que para el reactor se consideró una distribución Weibull; presentando un aumento en la tasa de falla del equipo y una reducción de su fiabilidad en términos del tiempo. Por otra parte, para los equipos con una tasa de falla ordenada según una



distribución Gamma, se encontró que la tasa de falla no muestra una variabilidad representativa y que en el intervalo de 20000 hr puede ser considerada aproximadamente constante; sin embargo, es de destacar el decrecimiento acelerado de la fiabilidad en el caso del separador, el intercambiador y tambor; ya que su reducción fue del 70% y 60% respectivamente, en comparación con lo obtenido para los tanques, donde la reducción fue del 0.02%.

Tabla 9. Fiabilidad y tasas de falla



Fuente: Elaboración propia.

1.6 Gráficos de control para el monitoreo de los equipos de la planta piloto

Con el propósito de generar estrategias para asegurar el funcionamiento apropiado de la planta piloto resulta importante integrar estrategias del control de las variables aleatorias de interés con la gestión del mantenimiento. Los gráficos de control se utilizan generalmente para monitorear y diagnosticar el desempeño de un proceso en el tiempo, permitiendo detectar posibles corrimientos de la magnitud en los valores nominales de los parámetros a los cuales se les hace seguimiento [45] [46]. Mientras que la gestión de mantenimiento se encarga de garantizar que las máquinas y equipos utilizados en los procesos estén disponibles y en la mejor condición de funcionamiento posible [47]. En ambos casos, el objetivo es el de lograr un producto de calidad óptima, donde el tiempo de parada de las máquinas sea corto y donde la reducción de costos se consiga a través del control de variaciones en el proceso; sin embargo, estas herramientas están tradicionalmente separadas tanto en la ciencia como en la práctica comercial [48].

En los trabajos donde se ha evaluado la integración de estas técnicas se ha considerado la determinación de los parámetros óptimos para el diseño en un gráfico de control y el tiempo de mantenimiento preventivo para un sistema de producción con una tasa de falla creciente [49]; la integración de gráficos de control y el mantenimiento preventivo, en el caso donde el proceso de deterioro del período de control se caracteriza por una distribución de probabilidad general con una tasa de riesgo creciente [50]; el estudio de gráficos de control junto con una política de mantenimiento preventivo de sustitución de edad [51] y el desarrollo de modelos integrados para la producción, el cronograma, el control de calidad y la política de mantenimiento [7].

1.6.1 Gráficos de control bilaterales

Los gráficos de control bilaterales cumplen una doble función, detectar cuando la variable que se está monitoreando alcanza magni-



tudes que se encuentran por debajo o por encima del valor nominal establecido, lo que permite identificar deterioros y mejoras en el funcionamiento del proceso. Lecturas periódicas del desempeño del proceso se transforman en un estadístico de control cuya estructura matemática depende del tipo de gráfico. Estos valores son representados en la gráfica mediante puntos, los cuales son comparados con dos líneas horizontales: los límites de control superior (*UCL Upper Control Limit*) para detectar corrimientos por arriba, e inferior, para corrimientos por debajo (*LCL Lower Control Limit*) [52].

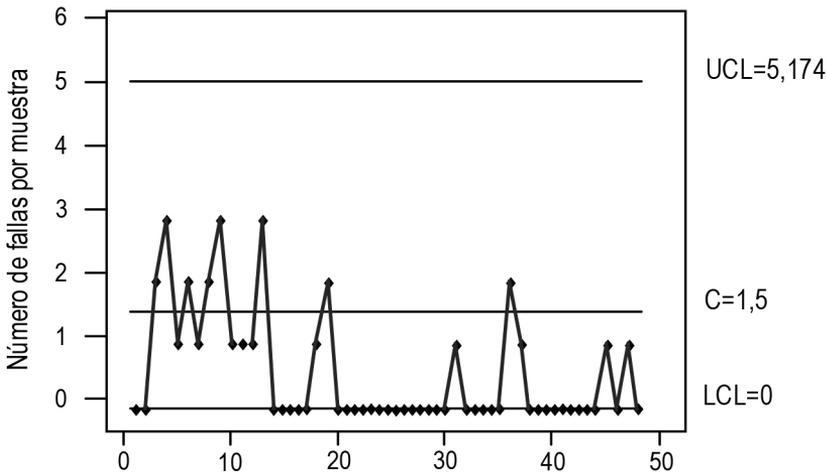
Se dice que el proceso está bajo control cuando los puntos que se grafican se encuentran entre *UCL* y *LCL*, siendo entonces innecesario tomar alguna medida. Cuando un punto se traza fuera de los límites de control, se sospecha que algo está fallando en el proceso y se comienza una investigación para encontrar y eliminar la causa de este comportamiento mediante acciones correctivas. Si el punto se encuentra por encima de *UCL*, la tasa de ocurrencia de fallas puede haber disminuido como resultado del aumento en el tiempo entre fallas. Si el punto trazado se encuentra debajo de *LCL* la ocurrencia de la tasa de fallos puede haber aumentado y en consecuencia se tiene una disminución en el tiempo de falla [53]. Existen ocasiones en las que todos los puntos se encuentran entre los límites establecidos, pero si se llegan a comportar con base en un patrón visible, se podría sospechar de alguna anomalía en el proceso. Para que se considere un proceso bajo control, los puntos deben tener un patrón aleatorio notable.

Para el monitoreo, se realiza un trazado del número de fallas o averías por unidad de tiempo (semanas o meses). La representación gráfica de estos eventos son denominados gráficos c-chart y u-chart, los cuales se diferencian en el hecho de que el primero permite monitorear el número de defectos de una muestra; mientras que el segundo monitorea el número promedio de defectos [53]. En particular, cuando el tiempo es la variable a monitorear, el gráfico de control se denomina t-chart.

En la Figura 5 se presenta un ejemplo del monitoreo periódico a través de un u-chart. En el caso particular en el que exista un nú-

mero excesivo de fallas, el gráfico indicará la situación descontrolada. Aunque existe la posibilidad de una falsa alarma anticipada, la probabilidad que el proceso no sea cambiado cuando el diagrama muestra una alarma, es del 0.27% para un gráfico tradicional. Esta probabilidad podría ser mayor, porque cuando el número de fallas se distribuye conforme a una distribución de Poisson, una distribución normal no es apropiada para los casos en el que el número promedio de fallos es bajo, debido a que el límite de control (*LCL*) generalmente se establece en cero, lo que no es útil, porque no permite la detección de la mejora del proceso [53].

Figura 5. Tradicional u-chart para el monitoreo del número de fallas por unidad de tiempo.



Fuente: Reliability Engineering & System Safety. [53]

Para realizar el monitoreo de la confiabilidad de los equipos que constituyen la planta piloto, se ha escogido como variable de estudio el tiempo entre fallos (t-chart). Esto se debe a que en un equipo reparable su condición operativa puede restaurarse después de fallar; por lo cual, durante su tiempo de vida útil pueden ocurrir varias fallas. Si el tiempo entre falla se incrementa, puede ser un indicador de buenas prácticas de mantenimiento, mientras que si el tiempo



entre fallas se reduce, puede ser un indicador de deficiencias en el mantenimiento, entre otros [53]. De acuerdo con la naturaleza de los equipos, se pueden seleccionar distribuciones de los tipos exponencial, Weibull, normal, gamma o log normal para describir estos tiempos entre fallos.

1.6.1.1 Gráfico de control para una variable aleatoria descrita por una distribución normal

En el caso que el tiempo entre fallos (variable aleatoria de interés) se encuentre distribuido normalmente, las expresiones para los límites del gráfico de control se pueden determinar empleando las siguientes expresiones [54]:

$$LCL = \mu - 3\sigma / \sqrt{n} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$CL = \mu \quad \text{Ecuación 12}$$

$$UCL = \mu + 3\sigma / \sqrt{n} \quad \text{Ecuación 13}$$

Siendo:

n : Número de eventos registrados.

μ : Media de los eventos registrados.

σ : Desviación estándar de los eventos registrados.

CL : Central Limit (Limite Central).

1.6.1.2 Gráfico de control para una variable aleatoria descrita por una distribución asimétrica

Sean $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}$ variables aleatorias originadas para la i -ésima muestra ($i = 1, 2, \dots, m$) de una población con función de probabilidad $f(\cdot)$. Se definen los siguientes estadísticos de interés [55]:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$X_{(n)} = \text{Max}\{X_{ij}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$X_{(1)} = \text{Min}\{X_{ij}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$R_{(n)} = X_{(n)} - X_{(1)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde $R_{(n)}$ corresponde al rango de las $m * n$ observaciones generadas. Entonces, se define K como una variable aleatoria definida por:

$$K = \frac{X_{(n)} - \bar{\bar{x}}}{R(x)} \quad \text{Ecuación 18}$$

Bajo el supuesto que $f(\cdot)$ es simétrica, tenemos que $K \cong 0.5$. Si la distribución es sesgada a la derecha $K > 0.5$, por el contrario si la distribución presenta un sesgo a la izquierda $K < 0.5$. De este modo, se establece un factor de corrección para el límite de control inferior $\sqrt{2(1-K)}$ y para el límite de control superior $\sqrt{2K}$. Así, los límites de control para la carta \bar{x} son [55]:

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \sqrt{2K} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \sqrt{2(1-K)} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde, A_2 depende n del tamaño de la muestra y se obtiene del cuadro adaptado de Acheson J. Duncan [56]. (Ver Tabla 10).

Tabla 10. Coeficientes A_2 para diferentes tamaños de la muestra

n	A_2
2	1.88
3	1.02
4	0.73
5	0.58
6	0.48
7	0.42
8	0.37
9	0.34
10	0.31

Fuente: Elaborado a partir de Quality Control and Industrial Statistics [56].

De esta manera, si la población es simétrica, el método se reduce al método Shewhart, pero si la población es sesgada el método ajusta los límites de acuerdo con el grado de asimetría que presenta la población objetivo.

1.6.2 *Gráficos de control para el monitoreo del tiempo entre fallas de los equipos reparables*

Con el propósito de comprender el comportamiento del tiempo entre fallas utilizando los diagramas de control para equipos reparables de una planta piloto del Centro I+D; resulta necesario determinar los eventos de fallo del equipo, donde un mantenimiento de tipo correctivo (co) haya sido ejecutado; o eventos de parada debido a la ejecución de un mantenimiento de tipo preventivo (pvo). En particular, para este análisis se han seleccionado los equipos con el mayor número de mantenimientos correctivos reportados, que son: la bomba de desplazamiento positivo y el reactor.

Tabla 11. Tiempos entre fallos para los equipos: mantenimiento correctivo (co) y mantenimiento preventivo (pvo)

Equipo	Fechas fallas	Tipo MTTO	Tiempo entre fallas (días)
Bomba Desplazamiento Positivo	21/07/2011	co	-
	23/02/2012	co	217
	12/02/2014	co	720
	7/10/2014	co	237
	28/08/2017	co	1056
	9/07/2018	co	315
Reactor R-01	24/03/1999	co	--
	18/04/2000	co	391
	3/12/2004	co	1690
	15/01/2005	co	43
	1/08/2007	co	928
	17/06/2014	co	2512
	14/08/2017	co	1154
	11/08/2017	pvo	n/a
	28/08/2017	pvo	n/a
	20/12/2017	co	128

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

En la Tabla 11, se muestran las fechas en las que se presentaron mantenimientos correctivos y preventivos en los equipos seleccionados. En la columna de tiempo entre fallas se reporta el intervalo entre la falla i -ésima y la falla $(i-1)$ -ésima.

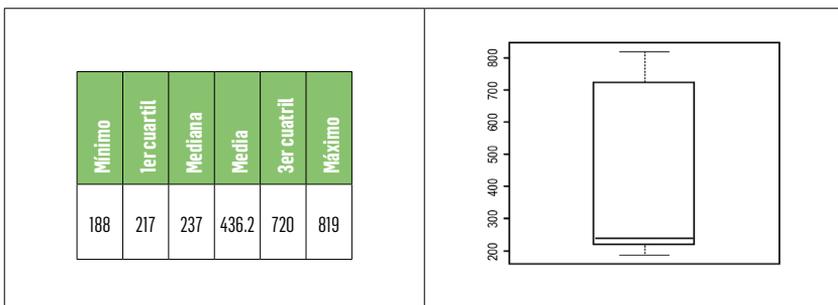
Debido a que el número de fallas reportadas por los equipos es limitado, para cuantificar los límites de los gráficos de control, en primer lugar, se evaluó la hipótesis de normalidad para el tiempo entre fallos de los equipos. De acuerdo con los resultados obtenidos de la validación de la hipótesis, se cuantificaron los límites UCL y LCL . Adicionalmente, se consideró la hipótesis de una distribución asimétrica para el tiempo entre fallos y se cuantificaron los límites UCL y LCL para analizar el comportamiento de esta variable.



1.6.3 Gráficos de control para la bomba de desplazamiento positivo

En la Tabla 12, se reporta el análisis estadístico de los tiempos entre fallas para la bomba de desplazamiento positivo, en unidades de días.

Tabla 12. Análisis estadístico entre fallos para la bomba desplazamiento positivo



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

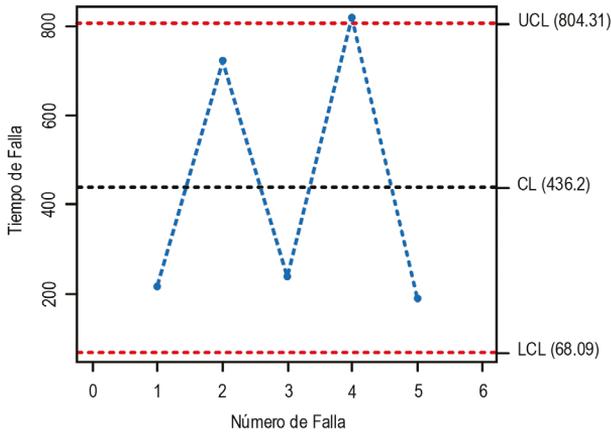
Para comprobar si el tiempo entre fallas para la bomba de desplazamiento positivo puede describirse por medio de una distribución normal, se realiza la prueba de normalidad *Shapiro-Wilk*, donde se obtiene $W = 0.77696$. Debido a que el $p\text{-value} = 0.05189$ es mayor a 0.05, no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, donde se considera que los datos proceden de una distribución normal.

Aceptada la hipótesis nula, se determinan los parámetros de la distribución normal característica, siendo la media de 436.2 días y la desviación estándar de 274.4 días.

En la Figura 6 se presenta el gráfico de control bajo la hipótesis de una distribución normal para los tiempos entre fallas de la bomba de desplazamiento, donde se tuvieron en cuenta la Ecuación 11, Ecuación 12 y Ecuación 13 para cuantificar $UCL = 804.31$ días, $LCL = 68.090$ días, y $LC = 436.20$ días. En este gráfico se evidencia

un punto que supera el valor UCL y por tal motivo resulta conveniente revisar el gráfico de control para el caso de una distribución asimétrica.

Figura 6. Gráfico de control bomba desplazamiento positivo – Distribución normal



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

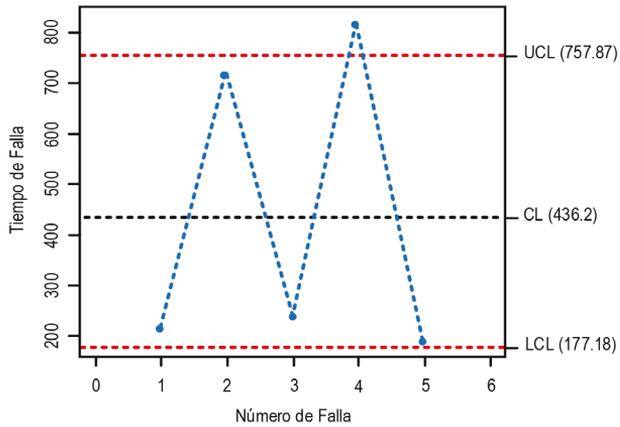
En la Figura 7 se presenta el gráfico de control bajo la hipótesis de una distribución asimétrica para los tiempos entre fallas de la bomba de desplazamiento donde se tuvieron en cuenta la Ecuación 19 y la Ecuación 20 para cuantificar $UCL = 757.9$ días y $UCL = 177.3$ días.

Para este caso, se encuentra que el intervalo para el proceso controlado resulta ser más estrecho; sin embargo, aunque se mantiene el punto que supera el valor UCL , no existen puntos por debajo del valor de LCL .

Este punto atípico permite evidenciar que hubo un aumento relevante en el tiempo entre fallos, lo que significa que de alguna forma se estaba realizando un buen manejo de los equipos en el periodo entre 2014 a 2017.



Figura 7. Gráfico de control bomba desplazamiento positivo – Distribución asimétrica

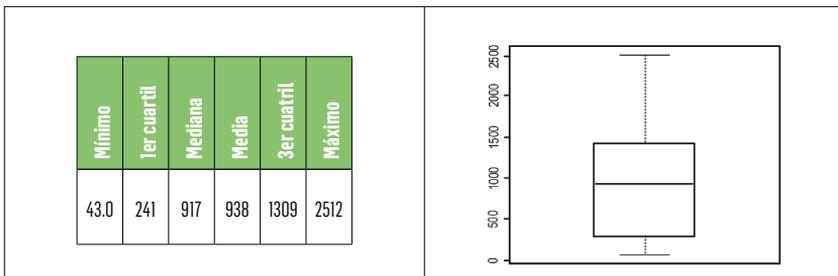


Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

1.6.4 Gráficos de control para el reactor

En la Tabla 13, se reporta el análisis estadístico de los tiempos entre fallas para el reactor, en unidades de días.

Tabla 13. Análisis entre fallos para el reactor

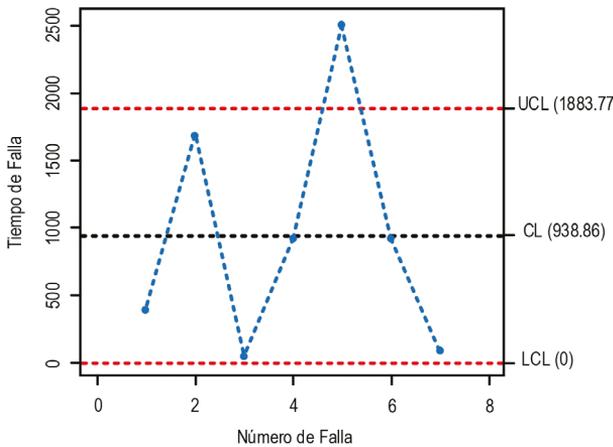


Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Para comprobar si es una distribución normal, se realiza la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk*: $W = 0.90612$ y $p\text{-value} = 0.3697$. Al observar que el $p\text{-value}$ es mayor que 0.05, no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, de que los datos proceden de una distribución normal. Por medio de un ajuste de distribución en R, por medio de la función *fit.cont* se determinaron los parámetros de la distribución normal con una media de 938.86 días y una desviación estándar de 833.34 días. Sin embargo, para trabajos futuros se recomienda contrastar los históricos con la información de la bitácora de la planta.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 8 se presenta el gráfico de control para el tiempo entre fallos del reactor, bajo la hipótesis de una distribución normal considerando su distribución; para el que se cuantificaron $UCL = 1883.8$ días, $LCL = 0$ y $CL = 938.86$ días usando la Ecuación 11, Ecuación 12 y Ecuación 13.

Figura 8. Gráfico de control para el Reactor – Distribución Normal



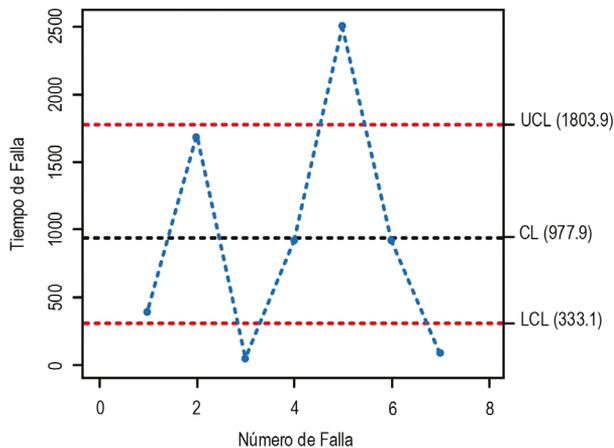
Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].



De esta manera se puede evidenciar que se encuentra un punto por encima de UCL y, por tal motivo, es necesario investigar qué evento particular aconteció en relación con la operación de la planta piloto.

Siguiendo esta metodología, en la Figura 9 se presenta el gráfico de control para el reactor, cuantificando los límites de control bajo la hipótesis de una distribución asimétrica para el tiempo entre fallos; para el que se cuantificaron $UCL = 1803.9$ días, $LCL = 333.1$ días y $CL = 977.9$ días usando la Ecuación 19 y la Ecuación 20.

Figura 9. Gráfico de control para el Reactor – Distribución Asimétrica



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

En este caso, se determinan tres puntos por fuera de los límites de control; dos por debajo de LCL y uno por encima de UCL . Los puntos por debajo de LCL representan una disminución relevante en el tiempo entre fallos, lo que debe ser evaluado respecto a las prácticas de mantenimiento preventivo que se están ejecutando para este equipo.

Conclusiones

Para el análisis de la fiabilidad de la planta piloto de procesos térmicos se realizó un estudio detallado con el propósito de comprender cómo se integran los equipos para cumplir con su función principal. Como consecuencia de este análisis, se determinó la jerarquización de la planta piloto estableciendo 9 sistemas, 4 subsistemas, 94 equipos, # componentes; además, se realizó la caracterización de los equipos involucrados en términos de su funcionalidad y reparabilidad. En términos de su funcionalidad se obtuvo que de los equipos analizados el 27% se clasifica como estáticos, el 4% en rotativos, el 16% en eléctricos y el 53% en electrónicos; mientras que en términos de la reparabilidad de equipos y componentes se encontró que el 45% corresponde al tipo reparable. Este análisis se fundamentó en los documentos técnicos y el apoyo del líder de la planta piloto.

En relación con el modelamiento probabilístico, se tomaron como variables aleatorias el tiempo hasta la falla para los equipos no reparables y el tiempo entre fallos para los equipos reparables; además, se seleccionaron las métricas de interés, que en este caso corresponden a la fiabilidad, la tasa de falla y el tiempo medio entre fallas. Adicionalmente, de acuerdo con la función desempeñada por el equipo, se determinaron las distribuciones de probabilidad más pertinentes para describir el tiempo hasta la falla de los equipos seleccionados para el análisis. Para alcanzar este propósito, resulta determinante contar con un número de muestras mínimo para que la inferencia tenga significancia estadística. En ese sentido, se propuso una estrategia para establecer la metodología para la estimación de la distribución de probabilidad y sus parámetros teniendo en cuenta el número de fallas encontradas en los históricos. Se estableció que se implementarían técnicas de inferencia de la distribución de probabilidad si se contaba con un número mayor de 10 reportes de falla del equipo; de lo contrario, los parámetros serían obtenidos usando bases de datos de fiabilidad tales como OREDA 2015. En particular, para ninguno de los equipos se encontró un tamaño de muestra superior a 10 fallas, de manera que todos los parámetros se determinaron usando las bases de datos. De esta manera, se en-



contró que el 62% de los equipos sigue una distribución exponencial, el 2% sigue una distribución Weibull y el 36% sigue una distribución gamma (para la tasa de falla).

Finalmente, se introdujeron los gráficos de control como estrategias de monitoreo del tiempo entre fallos. En particular, se realizó el estudio para la bomba de desplazamiento positivo (6 fallas) y el reactor (8 fallas), que corresponden a los equipos que presentan el mayor número de eventos de falla reportados en los históricos. Para ambos casos, se construyeron dos gráficos de control, uno basado en la hipótesis de normalidad y el otro, basado en la hipótesis de una distribución asimétrica. Tanto para la bomba de desplazamiento como para el reactor, se encontró un punto que supera UCL en ambos gráficos; mientras que para el caso del reactor se presentaron discrepancias en los puntos por debajo de LCL , debido a que en el gráfico de control normal no se reportó ningún punto; mientras que en el gráfico de control asimétrico se encontraron. La presencia de estos valores atípicos por fuera de los valores límites puede interpretarse como variaciones repentinas en el funcionamiento de los equipos que deben ser analizadas más detalladamente para identificar la causa especial de estos eventos.



Capítulo 2

Línea base de los planes de mantenimiento asociados a una planta piloto de procesos térmicos



2.1 Introducción

El objetivo del mantenimiento es conservar todos los elementos que componen un sistema, en condiciones óptimas de funcionamiento, con un buen nivel de calidad, confiabilidad y al menor costo posible. Por tanto, es necesario crear planes de mantenimiento, los cuales según la norma ISO 14224 [32], son un conjunto de tareas estructuradas y documentadas que incluyen las actividades, procedimientos, recursos y la escala de tiempo requerida para llevar a cabo el mantenimiento.

Según la norma UNE-EN-13306 [34], el mantenimiento se divide en mantenimiento preventivo y correctivo. Sus características son:

- **Mantenimiento preventivo:** mantenimiento que se realiza a intervalos predeterminados o de acuerdo con criterios establecidos, y que está destinado a reducir la probabilidad de fallo o la degradación de un elemento.
- **Mantenimiento correctivo:** mantenimiento que se realiza después del reconocimiento de una avería y que está destinado a poner un elemento en un estado que pueda realizar una función requerida.

De este modo, es posible afirmar que el mantenimiento preventivo es un mantenimiento totalmente planeado que implica la reparación o reemplazo de componentes a intervalos fijos, efectuándose para hacer frente a fallos potenciales. Y el mantenimiento correctivo o por fallos, se realiza cuando el equipo es incapaz de seguir operando porque los componentes están fallando o han fallado. Para el planteamiento de una línea base del mantenimiento llevado a cabo en la planta, se tuvo en cuenta los siguientes documentos:

- Plan anual de mantenimiento (PAM)
- Standards Jobs (SJ)
- Plan de calibración y metrología

2.2 Características del mantenimiento ejecutado en la actualidad

La estrategia de mantenimiento establecida es en función del tiempo, es decir preventivo, dichos mantenimientos se ejecutan para cada equipo basado en el Standard Job del mismo. En caso de falla, se aplica mantenimiento correctivo.

Las características de la estrategia de mantenimiento preventivo se definen de la siguiente forma:

“Programación en el plan de mantenimiento y frecuencia: el Plan Anual de Mantenimiento es un documento oficial en el que se encuentran presentes los equipos por planta a los cuales es necesario realizarle mantenimiento durante el año. Adicionalmente se establece la frecuencia con la que se realiza la actividad, la cual puede variar entre mantenimiento preventivo semestral y anual” [39].

“Standard Job y frecuencia: el Standard Job es un documento establecido por familias de equipos de plantas y laboratorios; además de uno por planta. En él se pueden encontrar los códigos de los equipos a los que aplica, la frecuencia del mantenimiento a realizar, la duración del mantenimiento preventivo general y por tarea, las herramientas, los insumos, repuestos y protección personal requerida, las medidas de seguridad a tener en cuenta y finalmente las tareas y actividades de mantenimiento, donde se especifica cuánto y de qué especialidad el personal es requerido” [39].

“Tareas y actividades de mantenimiento: se encuentran en los Standard Job, las tareas son más generales y se refieren a la revisión o mantenimiento de sistemas, mientras que las actividades se refieren específicamente a componentes o equipos del sistema del que habla la tarea” [39].

“Para el caso de la Planta Piloto de Procesos Térmicos, no se encuentra un Standard Job establecido para la planta en general; sin embargo, cuenta con el Standard Job de revisión de sistema de control donde se incluye el mantenimiento del motor agitador y relés, y



el Standard Job de pruebas funcionales de los interlocks de la planta en donde se incluye el mantenimiento para las termocuplas; para los demás equipos los Standards Jobs están establecidos individualmente” [39].

2.3 Frecuencia de mantenimiento

La frecuencia de mantenimiento se establece en el Plan Anual de Mantenimiento (PAM) y en el Standard Job (SJ). A continuación, están indicados los equipos programados para mantenimiento de la planta y la frecuencia con la que se realiza. (Tabla 14).

Tabla 14. Resultados equipos programados para mantenimiento

Equipo	Frecuencia PAM	Frecuencia SJ
Bomba de Engranajes	Anual	6 meses
Planta de viscorreducción	6 meses	6 meses
Baño termostatado refrigeración	PAM no encontrado	6 meses
Válvulas de seguridad	PAM no encontrado	Anual
Interlocks (prueba funcional)	PAM no encontrado	Falla
Planta de respaldo	PAM no encontrado	6 meses

Fuente: Elaboración a partir de Standard Jobs y citado en Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

Se encuentra que solo están programados dos equipos para mantenimiento (Plan Anual de Mantenimiento) y seis en el Standard Job de ciento setenta y cinco que tiene la planta y un mantenimiento general para la planta no especificado.

Solo se encuentran programadas en SAP las actividades de mantenimiento contenidas en el documento Plan Anual de Mantenimiento.

2.4 Componentes a sustituir o reacondicionar y su respectiva frecuencia

Debido a que en el documento Plan Anual de Mantenimiento, no se consideran los cambios o ajustes de componentes, esta información se obtiene a través de los Standard Jobs (Tabla 15).

Para la planta se presentan estos cambios o ajuste de componentes:

Tabla 15. Resultados ajustes de componentes

Equipo	Componente para cambio/ajuste		F. SJ/mantenedor
Baño termostato refrigeración	Cables y conexiones del sistema eléctrico		6 meses
	Mangueras		
Planta de respaldo	Correas del radiador		6 meses
	Cables y conectores del sistema eléctrico		
Bomba de engranajes	O-rings	Sellos	6 meses
	Engranajes	Cojinetes	
	Acople motor-bomba	Cables y conexiones del sistema eléctrico	
Válvulas de seguridad	Resorte	Anillo	6 meses
	O-ring	Asiento	
Interlocks	Termocuplas		Falla
Planta	Cables y conectores del sistema eléctrico		6 meses
	Tubbing	Resistencias	
	Filtros	Resorte	
	Vástago	Anillo	
	O-ring interno	Asiento	

Fuente: Elaboración a partir de Standard Jobs y citado en Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].



2.5 Recurso humano y su estimación

Los Standard Jobs cuentan con dicha información, la programación de mantenimiento, el tiempo empleado para ejecutar las actividades, el recurso humano, la cantidad requerida y su especialidad. (Tabla 16).

- Para la planta se presenta este recurso humano:

Tabla 16. Resultados recurso humano

Equipo	Recurso humano empleado	Estimación	Duración (h)
Baño termostatao refrigeración	Instrumentador (electrónico)	1	4.5
	Eléctrico	2	4.5
Planta general	Mecánico	1	9
	Ayudante	1	9
Válvulas de seguridad	Instrumentista	2	9
Bomba engranajes	Mecánico	1	9

Fuente: Elaboración a partir de Standard Jobs y citado en [39].

2.6 Actividades de calibración requeridas

La calibración en el centro de investigación se encuentra programada por planta y laboratorio a los equipos que así lo requieran, en un documento oficial "Calibración anual" las cuales se resumen a continuación (Tabla 17).

- Para la planta se encuentran las siguientes actividades de calibración:

Figura 10. Porcentaje de equipos calibrados.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Resultados actividades de calibración

Magnitud a calibrar	Presión:		Temperatura		Masa	
	8%		81%		12%	
Fecha programada según magnitud	Abril	83%	Febrero	37%	Enero	11%
		Agosto	17%	Abril	62%	Febrero
	Noviembre			2%	Marzo	67%

Fuente: Elaboración a partir de documento Calibración anual y citado en [39].

2.7 Equipos y herramientas requeridas para las actividades de mantenimiento

A través de los Standard Jobs son especificados tanto los equipos como las herramientas a utilizar en la ejecución de los planes de mantenimiento y son relacionados en la (Tabla 18).



- Para la planta se presentan estas herramientas:

Tabla 18. Resultados herramientas requeridas

Equipo	Herramientas	
Baño de enfriamiento	Multímetro digital. Pinza Voltiamperimétrica. Juego de Llaves fijas milimétricas. Destornillador de Estrella pequeño y grande. Destornillador de Pala pequeño y grande. Alicates para electricista. Pinza Plana. Manilla Antiestática. Cortafrío.	Juegos de llaves fijas milimétricas. Juegos de llaves hexagonales milimétricas. Juegos de copas milimétricas y de pulgadas. Mangueras de riego. Linterna. Brochas. Balde. Lanillas.
Planta general	Pinza Voltiamperimétrica. Pistola de luz infrarroja SKF. Hidrómetro. Aspiradora portátil. Alicates para electricistas. Juego de llaves mixtas de pulgadas.	Juego de llaves hexagonales de pulgadas. Llave de Tubo de 18" Llave de Correa para filtros. Martillo. Linterna. Brocha aislada. Lanillas.

Fuente: Elaboración a partir de Standard Jobs y citado en Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto [39].

Conclusiones

Después de establecer que los planes de mantenimiento ejecutados en la planta piloto son preventivos, con los cuales se busca ejecutar tareas de inspección, limpieza y reemplazo de aquellos componentes antes de que ocurra la falla, se procede a verificar las tareas de mantenimiento llevadas a cabo y la frecuencia con la que se realizan. Se toman de referencia algunos equipos con el propósito de ser analizados. Se encuentra que para la bomba de engranajes en el plan de mantenimiento está programada su revisión cada año, mientras que en los Standards Jobs su frecuencia es cada seis meses. En el caso de los Interlocks, ya que su probabilidad de falla es aleatoria, no se cuenta con una frecuencia determinada.



En lo referente a los componentes que se sustituyen o reacondicionan, para la bomba de engranes, se tiene establecido la inspección de o-rings, sellos, cojinetes, acople del motor con la bomba, los cables y conexiones del sistema eléctrico, cada 6 meses según el Standard Jobs. El recurso humano empleado corresponde a la designación de un mecánico, así como el listado de equipos y herramientas necesarias para llevar a cabo la tarea de mantenimiento, con una estimación de nueve horas en su ejecución.

Adicionalmente se estableció que las actividades de calibración en los diferentes equipos que así lo requieran, según su magnitud, el 8% corresponde a instrumentos de presión, el 81% a temperatura y el 12% a masa, cuya frecuencia es programada a través del documento oficial denominado "Calibración anual".



Capítulo 3

Análisis de fiabilidad de sistemas asociados a una planta piloto de procesos térmicos



3.1 Introducción

A continuación, se presentan algunos aspectos que son importantes para construir y certificar la funcionalidad de los diagramas de bloques y de los árboles de fallo.

3.2 Generalidades de los Diagramas P&ID

Un P&ID se define como un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), también conocido del idioma inglés como *pipng and instrumentation diagram/drawing* (P&ID), en el cual se muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental.

Un aspecto importante a tener en cuenta de los P&ID es acerca de los lazos; por ejemplo, un lazo de instrumentación está constituido por un conjunto de instrumentos interconectados y relacionados con una variable de proceso de interés. Para tener una buena numeración de los elementos conectados a un equipo se usa el sistema de numeración para etiquetarlos.

La identificación de un lazo de control implica que se debe asignar al elemento un único valor para que no se pueda confundir entre los diferentes instrumentos usados en la planta. Este tag tiene dos partes a saber, el primero es un indicador funcional que normalmente es un conjunto de letras y el segundo es el número del lazo.

Las letras pueden tener hasta 5 unidades que deben seguir las siguientes reglas:

- Todas las letras deben ser mayúsculas.
- La primera letra siempre designa la variable a la que está dedicada el instrumento.
- La segunda puede ser un modificador de la variable.

- La tercera puede indicar la función secundaria del instrumento.
- La cuarta puede ser la función principal del instrumento.
- La quinta puede ser una modificadora de la función principal del instrumento.

Estas letras tienen un único significado como se muestra de la Tabla 19 a la Tabla 23:

Tabla 19. Significados de la medida o variable de inicialización

letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable
A	Análisis	I	Corriente	Q	Cantidad	V	Vibración
B	Quemador	J	Potencia	R	Radiación	W	Peso
E	Voltaje	K	Tiempo	S	Velocidad	Y	Evento
F	Flujo	L	Nivel	T	Temperatura	Z	Posición
H	Manual	P	Presión	U	Multivariable		

Tabla 20. Significado del modificador

letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable
D	Diferencial	J	Scan	M	Momentáneo	S	Seguridad
F	Fracción	K	Rata de cambio	Q	Totalizador	X, Y, Z	Eje de interés

Tabla 21. Significado de la función pasiva

letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable
A	Alarma	I	Indicador	P	Punto	W	Poso
E	Sensor	L	Luz	R	Grabación	X	Sin clasificar
G	Vidrio	O	Orificio	U	Multifunción		

Tabla 22. Significado de la función de salida

letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable
C	Control	S	Interruptor	U	Multifunción	Y	Relé
K	Estación de control	T	Transmisor	V	Válvula	Z	Actuador



Tabla 23. Significado del modificador de función

letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable	letra	Variable
H	Alto	M	Medio	L	Bajo	U	Multifunción
X	Sin clasificación.						

Fuente: Elaboración propia.

La numeración del lazo puede ser serie o paralelo. La primera, implica una única secuencia de números para cada nueva letra; por ejemplo: TIC-100, FRC-100, TIC-101, AI-100, etc. La segunda numeración o paralela, implica empezar una secuencia numérica para cada primera letra, así, por ejemplo: TIC-100, FRC-100, LIC-100, TIC-101, AI-100, etc.

En caso de que el lazo tenga más de un instrumento con la misma identificación, se puede agregar un sufijo al número del lazo; por ejemplo, FV-2A, FV-2B, FV-2C, o FV-50-1, FV-50-2, FV-50-3. Se debe respetar que en el caso de usar letras, estas deben ser en mayúscula. A continuación, se presentan varios ejemplos (Tabla 24):

Tabla 24. Ejemplos de tag con su respectivo significado

Tag	Significado
FL 001	Indicador de flujo
TT 001	Transmisor de temperatura
FV 001	Válvula de control
ZSH 001	Interruptor de posición de alto nivel
LIC 201	Controlador e indicador de nivel
PDIC 300	Controlador e indicador de presión diferencial.
TDET 700	Transmisor con elemento principal de diferencial de temperatura.
PDIAM 100	Alarma por nivel alto e indicador diferencial de temperatura.
TDASH	Interruptor por nivel alto y alarma de diferencial de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Diagramas de Bloques de Fiabilidad, RBD

La norma UNE-EN-61078 [57], define un diagrama de bloques como la representación gráfica del comportamiento de fiabilidad de un sistema. Además, en un diagrama de bloques se muestran las conexiones gráficas de los componentes necesarios para el correcto funcionamiento del sistema. El modelo de bloques se aplica a sistemas considerados no reparables, aquellos donde no interesa el orden de generación de averías sino la razón por la cual se produce la avería y en consecuencia ocurre una parada de planta. Para desarrollar el método del análisis de confiabilidad y por consiguiente la realización de los diagramas de bloques para la Planta Piloto de Procesos Térmicos y los sistemas que lo componen, se tuvo en cuenta lo recomendado en la norma UNE-EN-61078 [57] y es lo siguiente:

- "Funcionamiento del sistema: este análisis sirve para diferentes modos de funcionamiento, al trabajar con sistemas separados de cada modo, se tratan independientes del resto con modelos de fiabilidad individuales. Cuando se utilizó el mismo sistema para todas las funciones, entonces se aplicaron diagramas separados para cada sistema. Para lo cual se definió con anterioridad cuál ocasiona el fallo en cada una de las funciones del sistema.
- Condiciones ambientales: las pautas del funcionamiento del sistema incluyen las condiciones ambientales del diseño del mismo. Se mencionan cada una de las condiciones que debe afrontar el equipo al transportarlo, almacenarlo y operarlo. Se identificó si los equipos se utilizarán en más de un entorno; las pruebas de fiabilidad se hicieron utilizando los diagramas de bloques y con tasas de fallo según el entorno.
- Ciclos de funcionamiento: se definieron según el tiempo real y operativo y teniendo en cuenta los ciclos de conexión y desconexión. Si al desconectar y conectar el equipo no se le ocasionan averías, esto se obvia, y solo se tiene en cuenta el tiempo operativo del equipo."



Con base en lo especificado anteriormente se realizaron los siguientes pasos para el desarrollo de los diagramas de bloques:

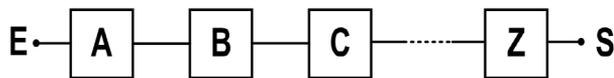
- Se especificó cuál es el concepto de éxito o fallo de cada uno de los sistemas que componen la planta.
- Se dividió cada sistema en bloques buscando que los equipos pertenecientes a cada uno de ellos estén trabajando enfocados en el mismo objetivo.
- Finalmente teniendo en cuenta el concepto de éxito o fallo del sistema, se desarrolla el diagrama de bloques que permita alcanzar el objetivo, el cual es el correcto funcionamiento de la planta piloto.

Se conocen varias configuraciones de los diagramas de bloques; estas son:

3.2.1.1 RBD en serie

La configuración en serie se realiza si, para que funcione el sistema, son necesarios todos los bloques, es decir, la falla de un componente da como resultado la falla de todo el sistema (Figura 11).

Figura 11. Configuración en serie para diagramas de bloques



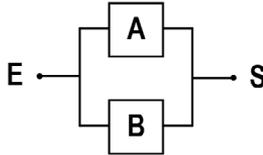
Fuente: Técnicas de análisis de la confiabilidad [57].

3.2.1.2 RBD en paralelo

Un diagrama de bloques de un sistema en paralelo se realiza cuando se desea tener una redundancia del sistema, es decir, si falla un bloque no afecta el funcionamiento del sistema (Figura 12).



Figura 12. Configuración en paralelo



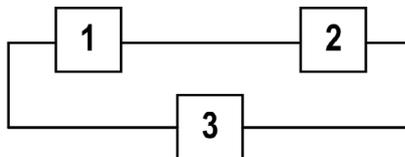
Fuente: Técnicas de análisis de la confiabilidad [57].

En la Figura 12 se muestra una configuración en paralelo simple, en el caso que A fallara, B lo reemplaza, por lo tanto, no afecta el funcionamiento del sistema; en otras palabras, para que el sistema tenga éxito debe funcionar como mínimo uno de los bloques. Generalmente esta configuración se utiliza para los sistemas críticos.

3.2.1.3 RBD mixto

Los diagramas de bloques expuestos anteriormente comprenden configuraciones solamente en serie o paralelo. En el caso de sistemas más complejos existe la posibilidad de una configuración donde se combinen, a estos diagramas de bloques se le llama diagrama de bloques de fiabilidad mixtos o modelos mixtos (Figura 13).

Figura 13. Configuración mixta para diagramas de bloques

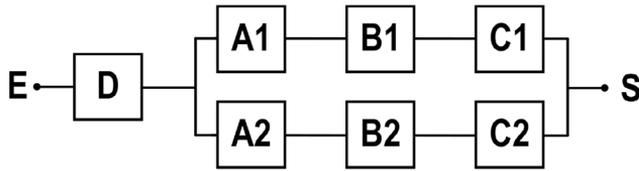


Fuente: Técnicas de análisis de la confiabilidad. [57]

Existen otras configuraciones mixtas como la que se muestra a continuación (Figura 14).



Figura 14. Configuración mixta para diagramas de bloques

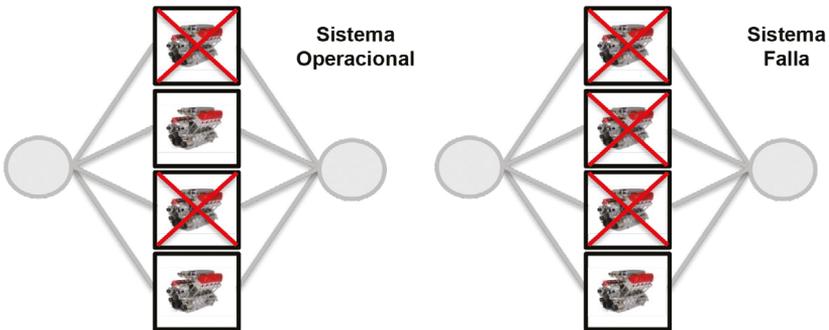


Fuente: Técnicas de análisis de la confiabilidad. [57]

3.2.1.4 RBD en paralelo con k de n

Es otra forma de representar la redundancia paralela de los diagramas de bloques de fiabilidad, donde se requiere como mínimo para que el sistema funcione, que k bloques de n tengan éxito (Figura 15).

Figura 15. Configuración en paralelo con "k" de "n", para diagramas de bloques



Fuente: System Analysis Reference. [58]

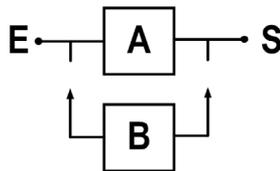
En la Figura 15 se muestra un diagrama de bloques de tipo paralelo k de n (2 de 4) y (3 de 4); para que el sistema funcione debe tener éxito como mínimo 2 bloques. Si falla 3 de 4, el sistema falla. Se pueden presentar dos casos en esta configuración: el primero, donde la fiabilidad de los bloques o componentes sean idénticos, en

este caso estos tienen la misma distribución de fallas, por lo tanto los componentes restantes no se ven afectados. El segundo, donde la fiabilidad de estos no son idénticos, en este caso la confiabilidad debe calcularse de manera distinta considerando todas las posibles combinaciones operativas.

3.2.1.5 RBD en paralelo pasiva

Esta configuración de diagramas de bloques recibe el nombre de redundancia stand by (Figura 16).

Figura 16. Configuración en paralelo pasiva para diagramas de bloques



Fuente: Técnicas de análisis de la confiabilidad. [57]

En la Figura 16 se muestra la configuración redundancia Stand by, donde el componente o bloque A está activo y B se encuentra en espera. B entra en funcionamiento cuando A falle. En la figura no se muestra el mecanismo de conmutación. En un diagrama de bloques de fiabilidad práctico, se deberían incorporar los bloques de fiabilidad del elemento de detección de fallo y el conmutador, debido a que estos son puntos críticos en los sistemas de *Stand by*.

3.3 Árboles de fallo apropiado a las características del sistema

Un árbol de fallo *Fault Tree Analysis* (FTA, por sus siglas en inglés), es uno de los métodos más ampliamente usados en sistemas de



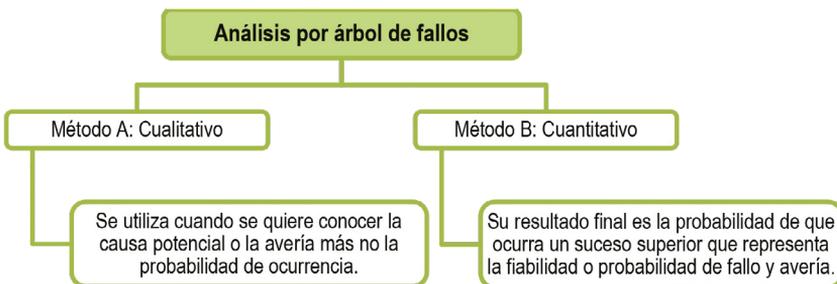
relatividad, mantenimiento y análisis de seguridad. Es un proceso deducible utilizado para determinar las varias combinaciones de fallas de equipo electrónico (*hardware*), programas de computación (*software*) y errores humanos que pueden causar eventos indeseables (referidos como eventos altos) en el sistema.

Teniendo en cuenta las técnicas de análisis de la confiabilidad [57] el FTA permite:

- *“Identificar y analizar las condiciones y factores que causan o que potencialmente pueden causar o contribuir la aparición de un suceso superior definido”.*
- *“El análisis por árbol de fallas es un método de análisis deductivo (arriba hacia abajo) dirigido a determinar las causas o combinaciones de causas que pueden conducir a un suceso superior definido”.*
- *“Representación gráfica organizada de las condiciones u otros factores que originan o contribuyen a la aparición de un resultado definido, al que se denomina suceso superior”.*

El análisis por árbol de fallos se estudia de dos maneras (Figura 17).

Figura 17. Métodos para el análisis por árbol de fallos



En los árboles de fallo se utilizan los siguientes términos:

- **Suceso:** ocurrencia de una condición o acción.
- **Suceso superior:** resultado de las combinaciones de todos los sucesos de entrada.
- **Puerta:** símbolo que se emplea para establecer una relación simbólica entre el suceso de salida y las entradas correspondientes.
- **Corte:** conjunto de sucesos que, si ocurrieran todos, producirían la ocurrencia del suceso superior.
- **Corte mínimo:** conjunto mínimo, o más pequeño, de sucesos que tienen que ocurrir para producir el suceso superior.

Los sucesos del árbol de fallo no son solo del tipo *hardware* o *software*, también pueden ser factores humanos.

Cuando no se pueda calcular la probabilidad de fallo de algunos sucesos, estos no se tendrán en cuenta en la predicción de la fiabilidad, pero sí como un caso en el método analítico (cualitativo).

Los componentes de un árbol de fallo son los siguientes:

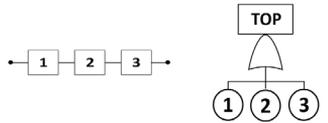
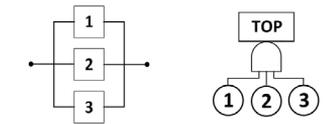
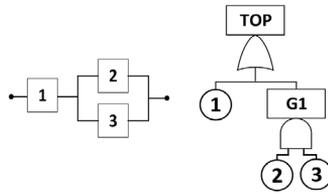
- **Puertas:** símbolos que muestran la relación LÓGICA entre sucesos de entrada y el suceso de salida. Estas se pueden dividir en dos:
 - **Estáticas:** el resultado **no depende** del orden de ocurrencia de las entradas.
 - **Dinámicas:** el resultado **depende** del orden de ocurrencia de las entradas.
- **Sucesos:** nivel más bajo de entrada de un árbol de fallo.

Para la elaboración del árbol de fallo o el FTA se emplearon las siguientes compuertas lógicas más comunes, éstas describen la



entrada que puede generar la falla, describir y entender cómo es el flujo del fallo (Figura 18).

Figura 18. Compuertas lógicas utilizadas para la elaboración del árbol de fallo

	Símbolo	Descripción	
Compuertas lógicas	Compuerta OR 	La puerta OR indica que el evento de salida A ocurre si ocurre alguno de los eventos de entrada Ei.	
	Compuerta AND 	La puerta AND indica que el evento de salida A ocurre solo cuando todos los eventos de entrada Ei ocurren al mismo tiempo.	
Eventos de entrada	Eventos básicos 	El evento Básico representa una falla del equipo que no requiere un mayor desarrollo de las causas de falla.	
	Evento no desarrollado 	El evento No desarrollado representa un evento que no se examina más a fondo porque la información no está disponible o porque su consecuencia es insignificante.	
Descripción	Rectángulo de comentario 	El rectángulo de comentario es para toda aquella información complementaria.	
Transferencia de símbolos	Transferencia salida 	El símbolo Transferencia de salida indica que el árbol de fallas se desarrolla aún más cuando aparece el símbolo Transferencia de entrada correspondiente.	
	Transferencia entrada 		

3.4 Efectos de las funciones de fiabilidad de los diferentes componentes en funcionamiento del sistema, en términos de probabilidad, detección y desempeño

La norma española de Técnicas de análisis de la confiabilidad [57], método del diagrama de bloques de la fiabilidad y métodos booleanos, describe procedimientos para realizar modelos de la confiabilidad de un sistema y para usar el modelo creado para calcular los valores de fiabilidad y disponibilidad. En la cual se menciona que el primer paso en la construcción del RBD es identificar los sistemas y sus funciones.

3.4.1 *Funcionamiento del sistema*

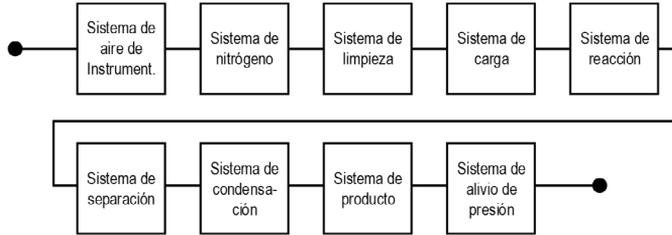
Se puede emplear un sistema en más de un modo de funcionamiento. Si se usan sistemas separados para cada modo, tales modos deberían tratarse independientemente del resto y deberían usarse modelos de fiabilidad independientes. Si se utiliza el mismo sistema para realizar todas las funciones, entonces deberían usarse diagramas separados para cada una de ellas. Debería establecerse claramente con anterioridad qué constituye un éxito o fallo del sistema para cada modo de funcionamiento del mismo.

3.4.2 *Sistemas de la Planta de Procesos Térmicos*

Estos sistemas fueron definidos teniendo en cuenta la norma anteriormente mencionada, fundamentando los sistemas en una sola función específica de acuerdo con el proceso de la planta, obteniendo los siguientes sistemas (Figura 19).



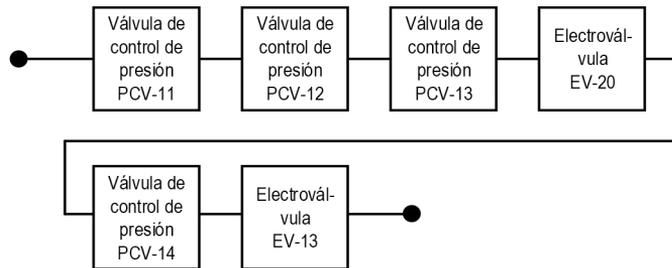
Figura 19. RBD por sistemas



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.1 Sistema de aire de instrumentación

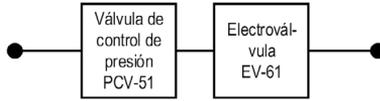
Figura 20. Sistema de aire de instrumentación



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.2 Sistema de nitrógeno

Figura 21. Sistema de nitrógeno



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.3 Sistema de limpieza

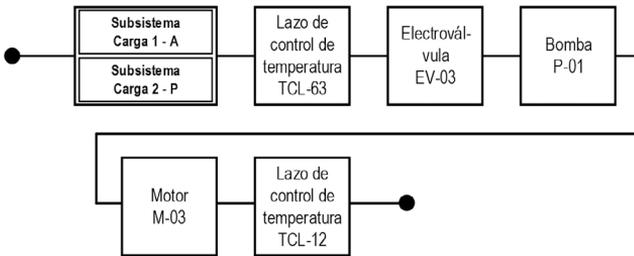
Figura 22. Sistema de limpieza



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.4 Sistema de carga

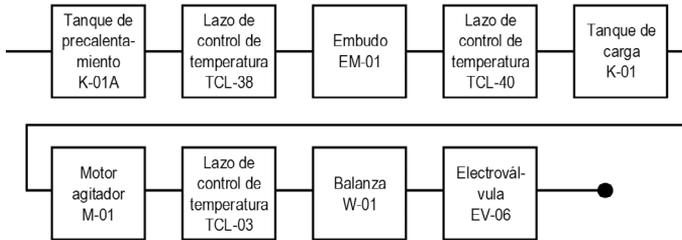
Figura 23. Sistema de carga



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

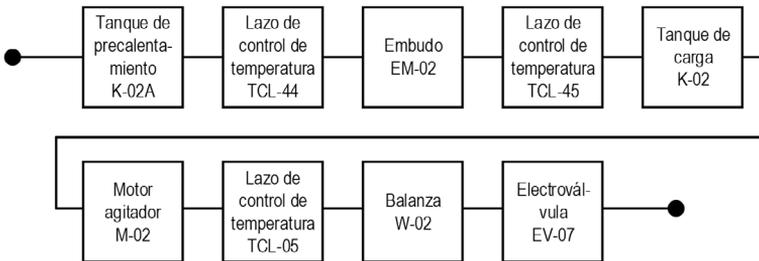


Figura 24. Subsistema Carga 1



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

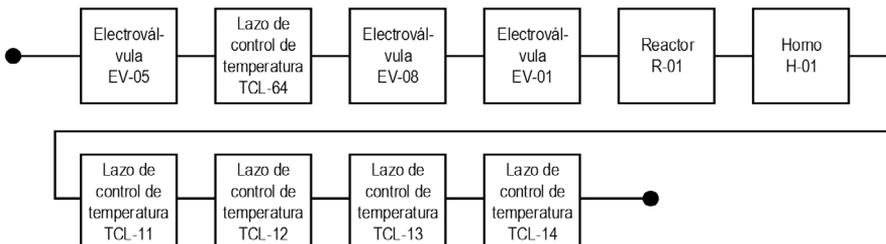
Figura 25. Subsistema Carga 2



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.5 Sistema de reacción

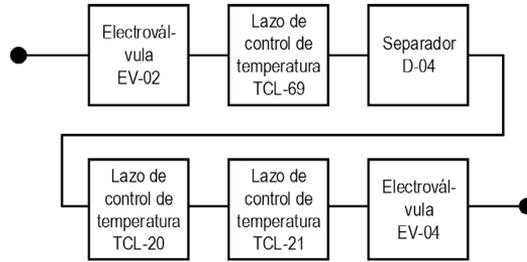
Figura 26. Sistema de reacción



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.6 Sistema de separación

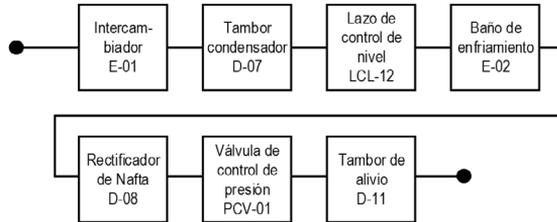
Figura 27. Sistema de separación



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.7 Sistema de condensación

Figura 28. Sistema de condensación



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.8 Sistema de producto

Figura 29. Subsistema 1: producto fondos viscorreducidos. Sistema de producto



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



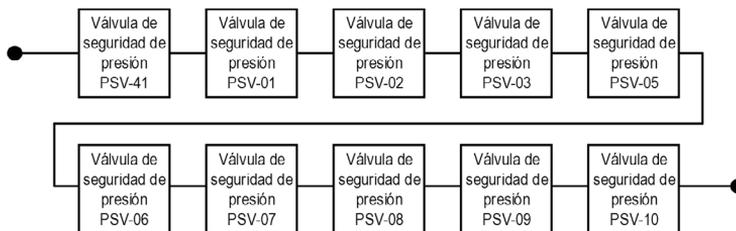
Figura 30. Subsistema 2: producto Nafta



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.4.2.9 Sistema de alivio de presión

Figura 31. Sistema de alivio de presión



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Es posible evidenciar que en la mayoría de sistemas que tiene la planta piloto la configuración de los diagramas de bloques es en serie, esto implica que si algún equipo o componente del sistema falla, entonces el sistema falla por completo.

3.5 Ecuación que integra los parámetros de fiabilidad para los diferentes sistemas

Es importante señalar que la fiabilidad de la planta y de cada uno de los sistemas se calcula de esta manera, debido a la configuración en serie que se hizo en los diagramas de bloques (ver Tabla 25).

Tabla 25. Ecuaciones de fiabilidad para la planta piloto y los sistemas que la componen

Ecuación de fiabilidad Planta de Procesos Térmicos	Ecuación 21
$R_{U-planta} = [R_{S,aire\ inst.} * R_{S,nitrógeno} * R_{S,limpieza} * R_{S,carga} * R_{S,reacción} * R_{S,separación} * R_{S,condensación} * R_{S,producto} * R_{S,alivio\ de\ presión}]$	
Fiabilidad Sistema de Aire	Ecuación 22
$R_{S,aire\ inst.} = R_{PCV-11} * R_{PCV-12} * R_{PCV-13} * R_{EV-20} * R_{PCV-14} * R_{EV-13}$	
Fiabilidad Sistema de Nitrógeno	Ecuación 23
$R_{S,nitrógeno} = R_{PCV-61} * R_{EV-61}$	
Fiabilidad Sistema de Limpieza	Ecuación 24
$R_{S,limpieza} = R_{K-14} * R_{TCL-42} * R_{EV-09}$	
Fiabilidad Subsistema de Carga 1	Ecuación 25
$R_{SB1,carga} = R_{K-01A} * R_{TCL-38} * R_{EM-01} * R_{TCL-40} * R_{K-01} * R_{M-01} * R_{TCL-03} * R_{W-01} * R_{TCL-63} * R_{EV-03} * R_{P-01} * R_{M-03} * R_{TCL-12}$	
Fiabilidad Subsistema de Carga 2	Ecuación 26
$R_{SB2,carga} = R_{K-02A} * R_{TCL-44} * R_{EM-02} * R_{TCL-45} * R_{K-02} * R_{M-02} * R_{TCL-05} * R_{W-02} * R_{TCL-07} * R_{EV-03} * R_{P-01} * R_{M-03} * R_{TCL-12}$	
Fiabilidad Sistema de Reacción	Ecuación 27
$R_{S,reacción} = R_{EV-05} * R_{TCL-64} * R_{EV-08} * R_{R-01} * R_{H-01} * R_{TCL-11} * R_{TCL-12} * R_{TCL-13} * R_{TCL-14}$	
Fiabilidad Sistema de Separación	Ecuación 28
$R_{S,separación} = R_{EV-02} * R_{TCL-69} * R_{D-04} * R_{TCL-20} * R_{TCL-21} * R_{LCL-04}$	
Fiabilidad Sistema de Condensación	Ecuación 29
$R_{S,condensación} = R_{E-01} * R_{D-07} * R_{LCL-12} * R_{E-02} * R_{D-08} * R_{PCV-01} * R_{D-11}$	
Fiabilidad Subsistema de Producto 1	Ecuación 30
$R_{SB1,producto} = R_{TCL-70} * R_{EV-10} * R_{K-05} * R_{TCL-24} * R_{W-03}$	
Fiabilidad Subsistema de Producto 2	Ecuación 31
$R_{SB2,producto} = R_{EV-14} * R_{K-09} * R_{W-05}$	
Fiabilidad Sistema de Alivio de Presión	Ecuación 32
$R_{S,alivio\ de\ presión} = R_{PSV-41} * R_{PSV-01} * R_{PSV-02} * R_{PSV-03} * R_{PSV-05} * R_{PSV-06} * R_{PSV-07} * R_{PSV-08} * R_{PSV-09} * R_{PSV-10}$	

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



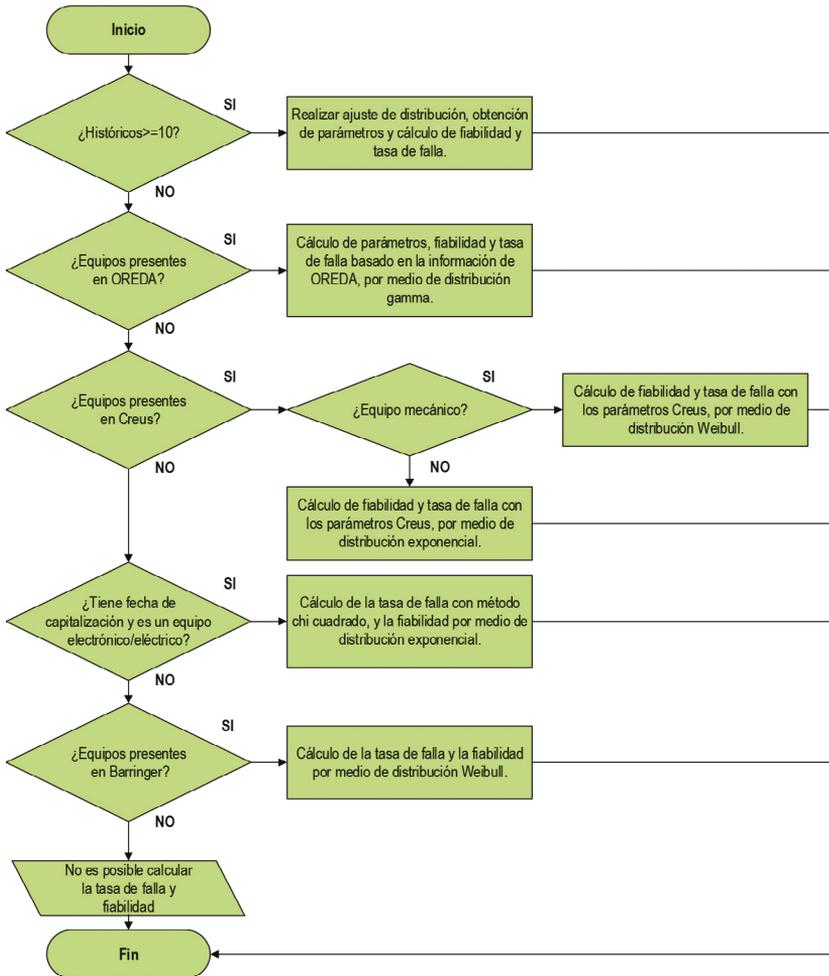
Para determinar los valores de fiabilidad de cada uno de los componentes y equipos que conforman los sistemas de la planta piloto de procesos térmicos fue necesario recolectar los históricos de fallas disponibles en softwares como SAP y Ellipse, además de las bitácoras existentes; con esta información se cuantificó el tiempo entre fallos y la tasa de falla de acuerdo con la distribución que mejor se ajustó a los datos recopilados, parámetro requerido para la determinación de la fiabilidad.

Para el caso de aquellos equipos o componentes donde la información recolectada no fue suficiente, se recurrió a bases de datos como OREDA [42], Barringer [44] y el libro "Fiabilidad y Seguridad" de Creus Solé [43], de donde se obtuvieron los parámetros requeridos para el cálculo de la fiabilidad dependiendo de la distribución manejada en cada una de estas fuentes bibliográficas.

En la Figura 32 se relaciona un diagrama donde se puede visualizar el proceso utilizado para obtener las magnitudes de la fiabilidad de cada componente y equipo que conforman los sistemas de la planta piloto.

En la Tabla 26 se pueden ver los resultados de la Ecuación 21 a la Ecuación 32, siendo evaluadas con tiempo de 6 meses y de un año, considerando los equipos referentes a cada sistema; además, se realiza el cálculo de fiabilidad por sistemas a partir de una fiabilidad de 85% por equipo, definido como el límite aceptable y también el cálculo, asumiendo un límite óptimo de fiabilidad por equipo del 95%.

Figura 32. Proceso utilizado para obtener las magnitudes de fiabilidad de los componentes y equipos que conforman la planta piloto de procesos térmicos



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



Tabla 26. Resultados de fiabilidad por sistemas de la planta

Sistema	Cantidad de equipos	R(t) en horas con t = 6 meses (real)	R(t) en horas con t = 1 año (real)	R(t) equipos con R(t) = 85% (aceptable)	R(t) equipos con R(t) = 95% (óptimo)
Sistema Aire de instrumentación	6	44.69%	21.02%	37.71%	73.51%
Sistema Nitrógeno	2	78.95%	63.12%	72.25%	90.25%
Sistema de Limpieza	3	65.96%	43.51%	61.41%	85.74%
Subsistema Carga 1	9	19.04%	3.67%	23.16%	63.02%
Subsistema Carga 2	9	19.04%	3.67%	23.16%	63.02%
Sistema Carga	23	13.71%	1.17%	18.17%	66.80%
Sistema Reacción	10	14.28%	2.04%	19.69%	59.87%
Sistema Separación	6	18.41%	3.48%	37.71%	73.51%
Sistema Condensación	7	27.97%	8.22%	32.06%	69.83%
Subsistema de Producto 1: Fondos viscorreducidos	5	32.36%	10.47%	44.37%	77.38%
Subsistema de Producto 2: Nafta	3	63.57%	40.42%	61.41%	85.74%
Sistema Alivio de Presión	10	77.08%	59.69%	19.69%	59.87%
Planta con Subsistema de Producto 1	72	0.01%	0.000000248%	0.0063%	5.41%
Planta con Subsistema de Producto 2	70	0.01	0.000000956%	0.0088%	5.99%

De la Tabla 26 es posible decir que los sistemas/subsistemas de la planta a seis meses el 41.66% de ellos se encuentra por encima del límite aceptable de fiabilidad y por el contrario solo el 8.33% de los sistemas se encuentra por encima del límite aceptable a un año. Además se puede ver que solo el 8.33% de los sistemas se encuentra por encima del límite óptimo evaluándolos a seis meses y para un año tan solo sería el 0% de los sistemas de la planta.

Por otra parte, en los dos casos de seis meses o un año, al calcular la fiabilidad total por modo de operación de la planta, el 100% de los modos de operación estaría por encima del límite aceptable de fiabilidad; sin embargo, en el caso del límite óptimo ninguno de los sistemas sobrepasaría dicho límite.

Sin embargo, es importante explicar que si bien los valores de fiabilidad de la planta se encuentran por encima del límite aceptable, la fiabilidad real sigue siendo una fiabilidad muy baja total por modo de operación de la planta, situación que obedece a la configuración de los sistemas y la planta en general la cual es una configuración de equipos en serie en un 88.89%, lo que hace que aunque los valores de la fiabilidad aumenten, el hecho de no tener un equipo de respaldo en caso de que falle otro, es decir, una configuración en paralelo en la mayoría de los sistemas, la fiabilidad de la planta siempre tenderá a ser baja y por ende la probabilidad de parada (falla) de la planta será más alta.

3.6 Resultados de fiabilidad de la planta

Tabla 27. Resultados fiabilidad planta piloto

Sistema	Fiabilidad a 1 año
Sistema Aire de instrumentación	0.4469
Sistema Nitrógeno	0.7895
Sistema de limpieza	0.6596
Subsistema Carga 1	0.1904
Subsistema Carga 2	0.1904

Continúa...



Continuación

Sistema	Fiabilidad a 1 año
Sistema Reacción	0.1428
Sistema Separación	0.1841
Sistema Condensación	0.2797
Subsistema Producto 1	0.3236
Subsistema Producto 2	0.6357
Sistema Alivio de presión	0.7708

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

De estas actividades se puede obtener un listado de equipos críticos por sistemas de la planta, a causa de las rutas críticas y de las fiabilidades en los sistemas respectivamente. Este listado de criticidad de equipos se enuncia en la Tabla 28.

Tabla 28. Listado de criticidad de equipos

Sistema	Según rutas críticas	Según fiabilidades de los sistemas
Sistema de nitrógeno	EV-61 Electroválvula	
Sistema de limpieza	K-14 Tanque De Almacenamiento Para Alc	K-14 Tanque De Almacenamiento Para Alc
Subsistema de carga	K-01A Tanque de precalentamiento K-01 Tanque de carga K-02A Tanque de precalentamiento K-02 Tanque de carga P-01 Bomba centrífuga de engranaje	W-01 Balanza W-02 Balanza
Sistema de reacción	TCL-64 Lazo de control de temperatura R-01 Reactor H-01 Horno TCL-11 Lazo de control de temperatura TCL-12 Lazo de control de temperatura TCL-13 Lazo de control de temperatura TCL-14 Lazo de control de temperatura	EV-05 Electroválvula EV-08 Electroválvula EV-01 Electroválvula
Sistema de separación	D-04 Separador	D-04 Separador
Sistema de condensación		D-08 Rectificador de nafta D-11 Tambor de alivio

Continúa...

Continuación

Sistema	Según rutas críticas	Según fiabilidades de los sistemas
Sistema de producto	K-05 Tanque de fondos TCL-70 Lazo de control de temperatura	W-03 Balanza W-05 Balanza
Sistema de alivio de presión y venteo	PSV-09 Válvula de seguridad	

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

De la Tabla 28 se puede concluir que el porcentaje de equipos críticos según fiabilidad es menor que el porcentaje de equipos de las rutas críticas: 11.70% vs 24.74% respectivamente.

3.7 Elementos que deben funcionar correctamente para que el sistema cumpla su función prevista

Considerando los diagramas de bloques (RBDS) y las ecuaciones de fiabilidad expresadas anteriormente, los elementos que deben funcionar correctamente para el éxito de los sistemas son: (ver Tabla 29).

Tabla 29. Elementos que deben funcionar correctamente para el éxito de los sistemas en la planta piloto de procesos térmicos

Sistema	TAG	Equipo
Sistema de aire de instrumentación	PCV-11	Válvula de control de presión
	PCV-12	Válvula de control de presión
	PCV-13	Válvula de control de presión
	EV-20	Electroválvula
	PCV-14	Válvula de control de presión
	EV-13	Electroválvula
Sistema de nitrógeno	PCV-51	Válvula de control de presión
	EV-61	Electroválvula

Continúa...



Continuación

Sistema	TAG	Equipo
Sistema de limpieza	K-14	Tanque De Almacenamiento Para Alc
	TCL-42	Lazo de control de temperatura
	EV-09	Electroválvula
Subsistema de carga 1	K-01A	Tanque de precalentamiento
	TCL-38	Lazo de control de temperatura
	EM-01	Embudo
	TCL-40	Lazo de control de temperatura
	K-01	Tanque de carga
	M-01	Motor agitador
	TCL-03	Lazo de control de temperatura
	W-01	Balanza
	EV-06	Electroválvula
Subsistema de carga 2	K-02A	Tanque de precalentamiento
	TCL-44	Lazo de control de temperatura
	EM-02	Embudo
	TCL-45	Lazo de control de temperatura
	K-02	Tanque de carga
	M-02	Motor agitador
	TCL-05	Lazo de control de temperatura
	W-02	Balanza
	EV-07	Electroválvula
Sistema de carga	Subsistema de carga 1	
	Subsistema de carga 2	
	TCL-63	Lazo de control de temperatura
	EV-03	Electroválvula
	P-01	Bomba centrífuga de engranaje
	M-03	Motor
	TCL-12	Lazo de control de temperatura

Continúa...

Continuación

Sistema	TAG	Equipo
Sistema de reacción	EV-05	Electroválvula
	TCL-64	Lazo de control de temperatura
	EV-08	Electroválvula
	EV-01	Electroválvula
	R-01	Reactor
	H-01	Horno
	TCL-11	Lazo de control de temperatura
	TCL-12	Lazo de control de temperatura
	TCL-13	Lazo de control de temperatura
TCL-14	Lazo de control de temperatura	
Sistema de separación	EV-02	Electroválvula
	TCL-69	Lazo de control de temperatura
	D-04	Separador
	TCL-20	Lazo de control de temperatura
	TCL-21	Lazo de control de temperatura
	LCL-04	Lazo de control de nivel
Sistema de condensación	E-01	Intercambiador
	D-07	Tambor condensador
	LCL-12	Lazo de control de nivel
	E-02	Baño de enfriamiento
	D-08	Rectificador de nafta
	PCV-01	Válvula de control de presión
	D-11	Tambor de alivio
Subsistema 1 producto fondos viscorreducidos	TCL-70	Lazo de control de temperatura
	EV-10	Electroválvula
	K-05	Tanque de fondos
	TCL-24	Lazo de control de temperatura
	W-03	Balanza
Subsistema 2 producto nafta	EV-14	Electroválvula
	K-09	Tanque de nafta
	W-05	Balanza

Continúa...



Continuación

Sistema	TAG	Equipo
Sistema de alivio de presión y venteo	PSV-01	Válvula de Seguridad
	PSV-02	Válvula de Seguridad
	PSV-03	Válvula de Seguridad
	PSV-05	Válvula de Seguridad
	PSV-06	Válvula de Seguridad
	PSV-07	Válvula de Seguridad
	PSV-08	Válvula de Seguridad
	PSV-09	Válvula de Seguridad
	PSV-10	Válvula de Seguridad
	PSV-41	Válvula de Seguridad

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

3.8 Riesgo y nivel de afectación en términos de seguridad

Se tiene en cuenta el HAZOP lo cual se constituye en: "OBJETIVOS":

Detectar riesgos, sus orígenes, sus consecuencias y sus remedios mediante análisis, cualitativo pero sistemático y escrupuloso, que considera el meollo del proceso que son las desviaciones de sus variables. Al hacer la identificación sistemática de los riesgos facilita, al discernimiento de analistas, decidir cuáles de esos deben ser objeto de análisis más afinado mediante métodos más detallados y/o cuantitativos.

Análisis sistemático de las desviaciones plausibles en todas y cada una de las variables de proceso, respecto de los valores de diseño que se consideran como de operación normal (tales valores cuantifican la intención de diseño o cometido previsto para el elemento que es objeto de análisis). [59]

Para resolver lo anterior, primero se debe tener en cuenta los eventos peligrosos que ocurren en la planta; por lo cual, para construir y certificar la funcionalidad de los árboles de fallo apropiados a las

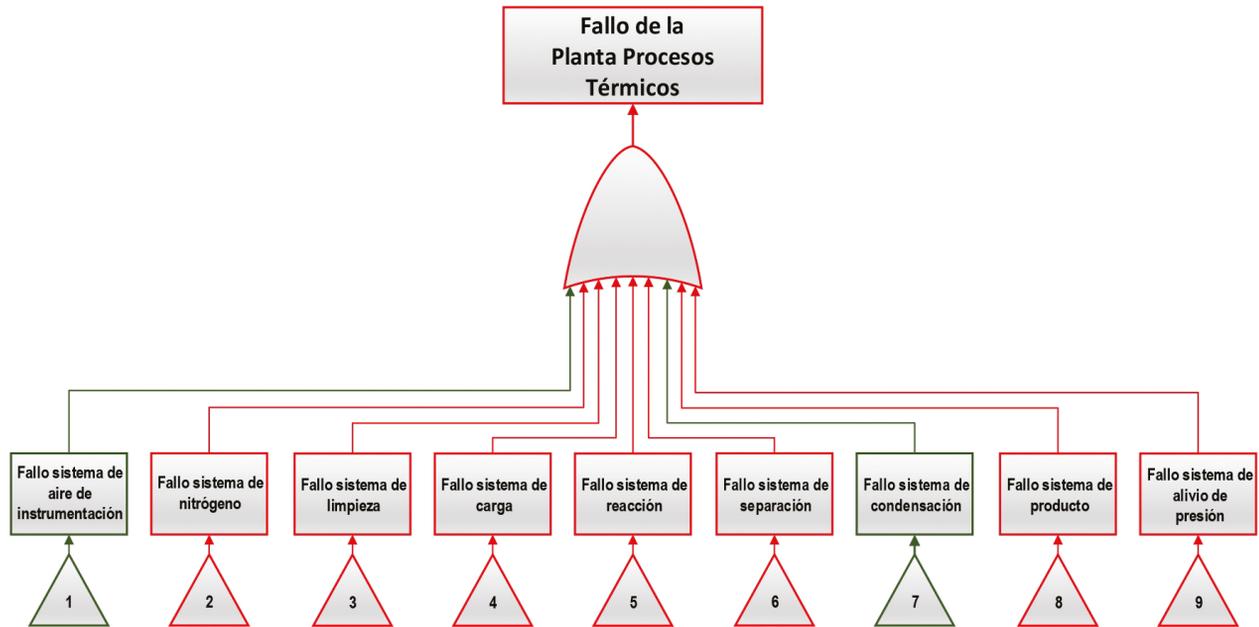
características del sistema, se tienen en cuenta los diagramas de bloques (RBDS) y a partir de ellos se especifican los sistemas y equipos en cada uno de ellos.

Adicionalmente, es necesario identificar las rutas críticas en el árbol de fallos, es decir, el equipo con su modo de falla correspondiente que causa falla en un sistema y a su vez causa falla en la planta. Con el objetivo de cumplir con lo anterior se toma el HAZOP de la planta y se identifican cuáles son los equipos críticos, tomando como prioridad las consecuencias de falla clasificadas como "Alta" (ver Figura 33).

De la Figura 33 se pueden resaltar siete rutas críticas de fallos presentes en la planta: sistema de nitrógeno, sistema de limpieza, sistema de carga, sistema de reacción, sistema de separación, sistema de producto y alivio de presión que se explicarán a continuación.

- **Sistema de nitrógeno:** En este sistema se puede presentar una falla por el cierre y fallo de la EV-61 debido a un aumento de presión, lo que produciría una fuga de material tóxico y explosión o incendio. (Figura 34)
- **Sistema de limpieza:** En este sistema se puede presentar un enfriamiento o fallo del tanque K-14, a causa de una disminución de presión que puede ocasionar una explosión o incendio en la planta (Figura 35).
- **Sistema de carga:** En este sistema se puede presentar un taponamiento o falla en la operación de la bomba P-01, produciendo un aumento de presión y temperatura, que puede ocasionar una fuga de material tóxico, explosión o incendio (Figura 36, 37 y 38). En los subsistemas de carga 1 y 2 se puede presentar una succión de los tanques K-01A y K-02A a causa de una disminución de presión que puede ocasionar una explosión o un incendio.

Figura 33. Árbol de fallo general

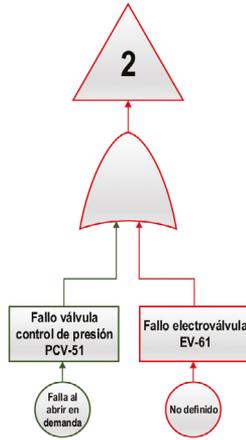


Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



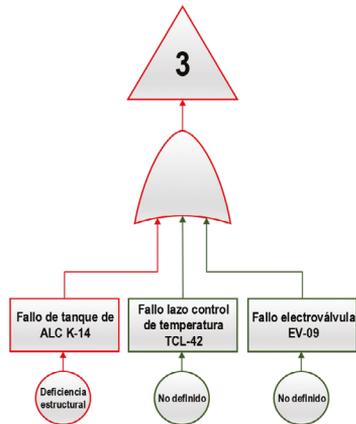


Figura 34. Árbol de fallo sistema nitrógeno



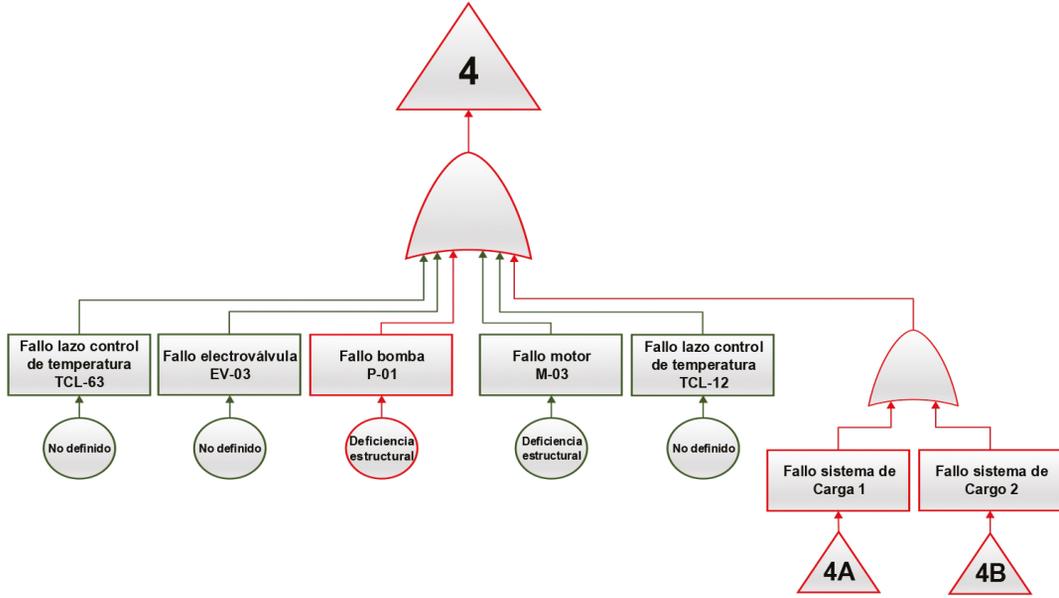
Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Figura 35. Árbol de fallo sistema limpieza



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Figura 36. Árbol de fallo sistema de carga

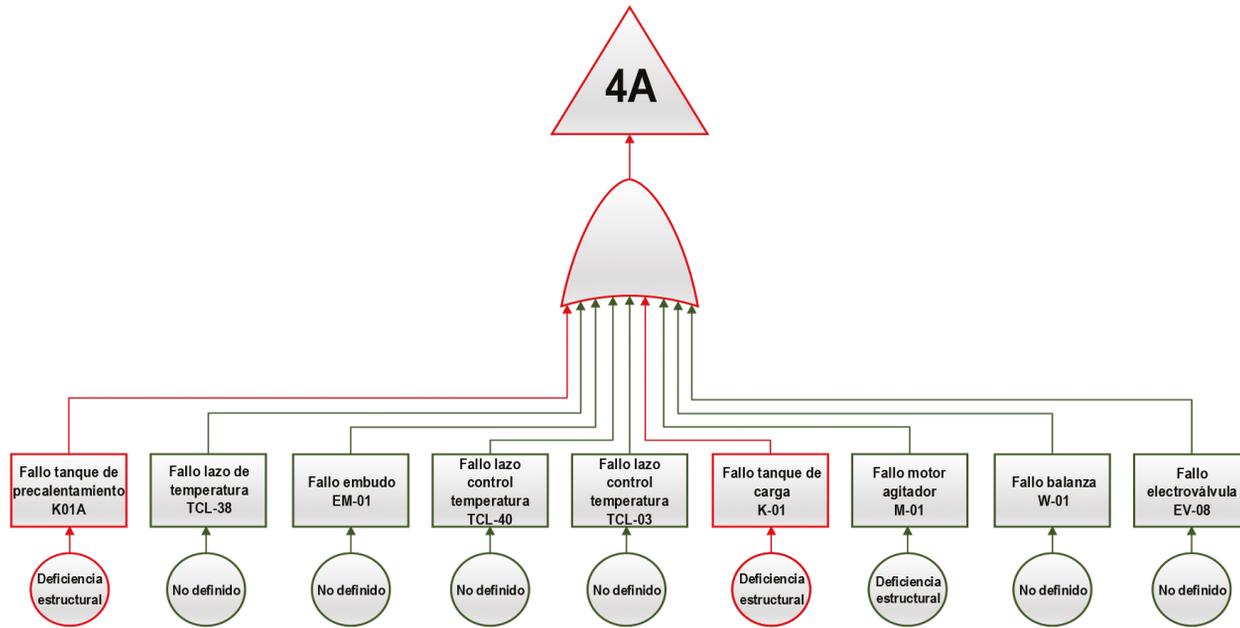


Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



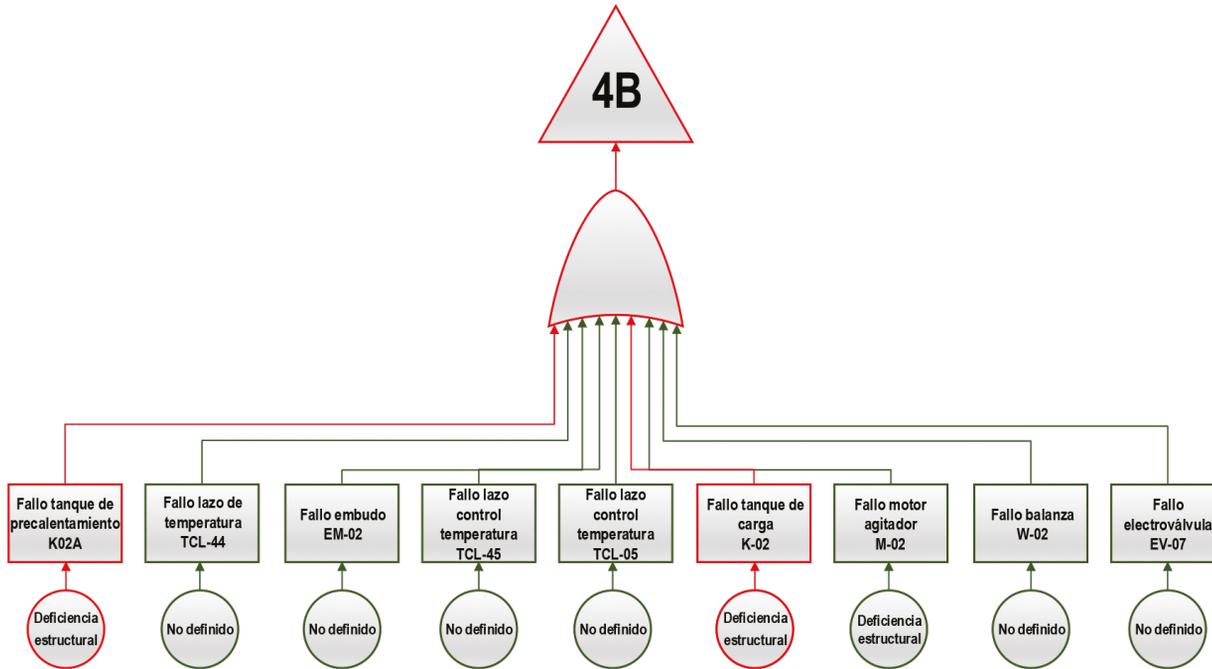


Figura 37. Árbol de fallo subsistemas de carga 1



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Figura 38. Árbol de fallo subsistemas de carga 2

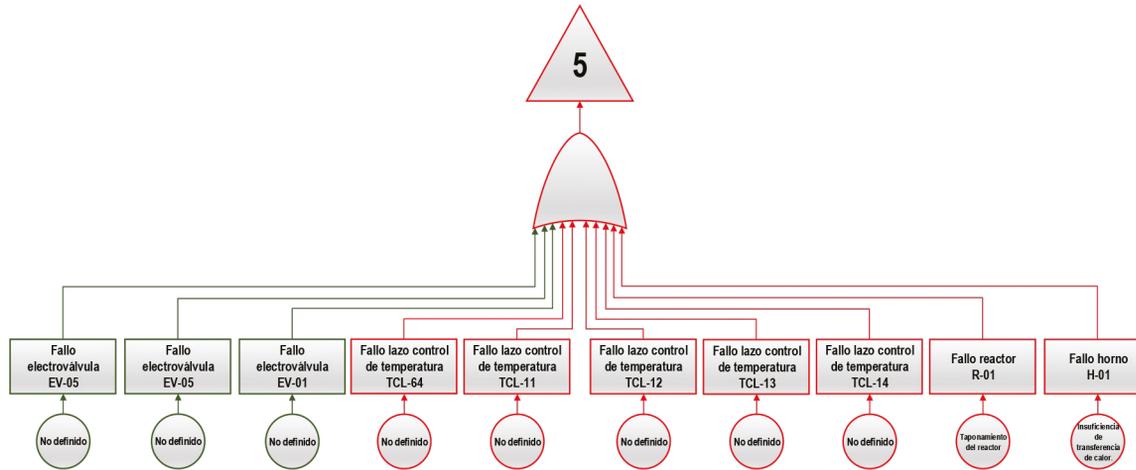


Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



- **Sistema de reacción:** En este sistema se puede presentar el taponamiento y fallo en el reactor R-01 o sobrecalentamiento del horno H-01 debido a un aumento de presión que puede ocasionar una fuga de material tóxico. Adicionalmente, se puede presentar falla en las resistencias del horno H-01 o falla en los sensores de temperatura de TCL-64, TCL-11, TCL-12, TCL-13 y TCL-14 a causa de un aumento de temperatura (Figura 39).
- **Sistema de separación:** En este sistema de la planta puede ocurrir una falla de las resistencias del separador D-04, a causa de un aumento de temperatura provocando con ello una fuga de material tóxico (Figura 40).
- **Sistema de producto:** En el sistema puede ocurrir una falla de las resistencias del separador D- 04 y fallo en el tanque de fondo K-05 o un fallo de lectura errónea del TCL-70, a causa de un aumento de temperatura que puede generar una explosión o incendio (Figura 41).
- **Sistema de alivio de presión:** En este sistema se puede presentar una alta presión que no permita la evacuación de la PSV-09, generando a su vez una posible fuga de material tóxico (Figura 42).

Figura 39. Árbol de fallo sistema de reacción

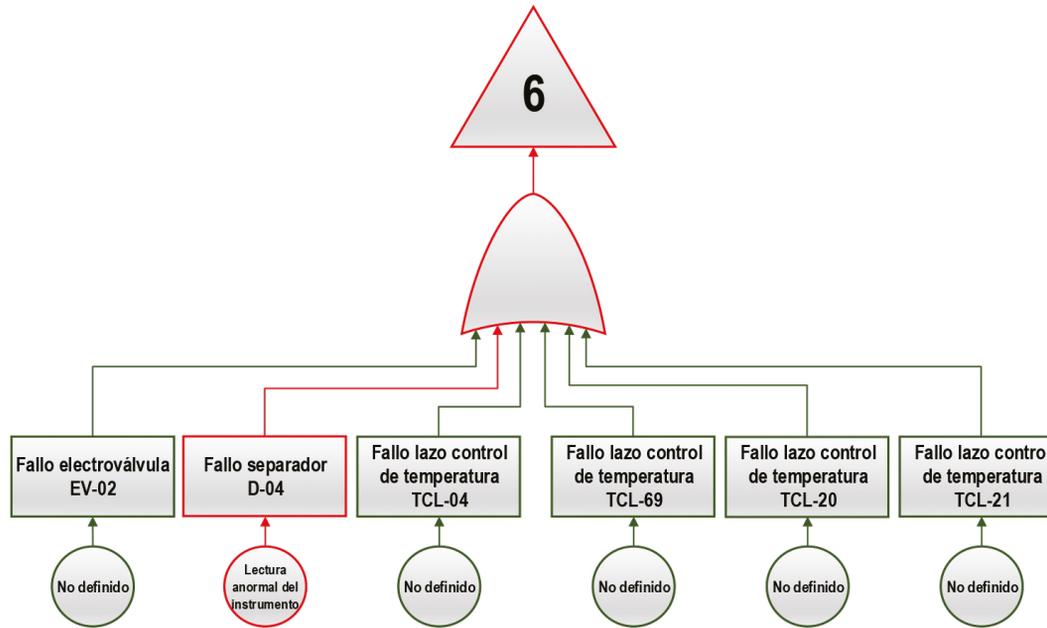


Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



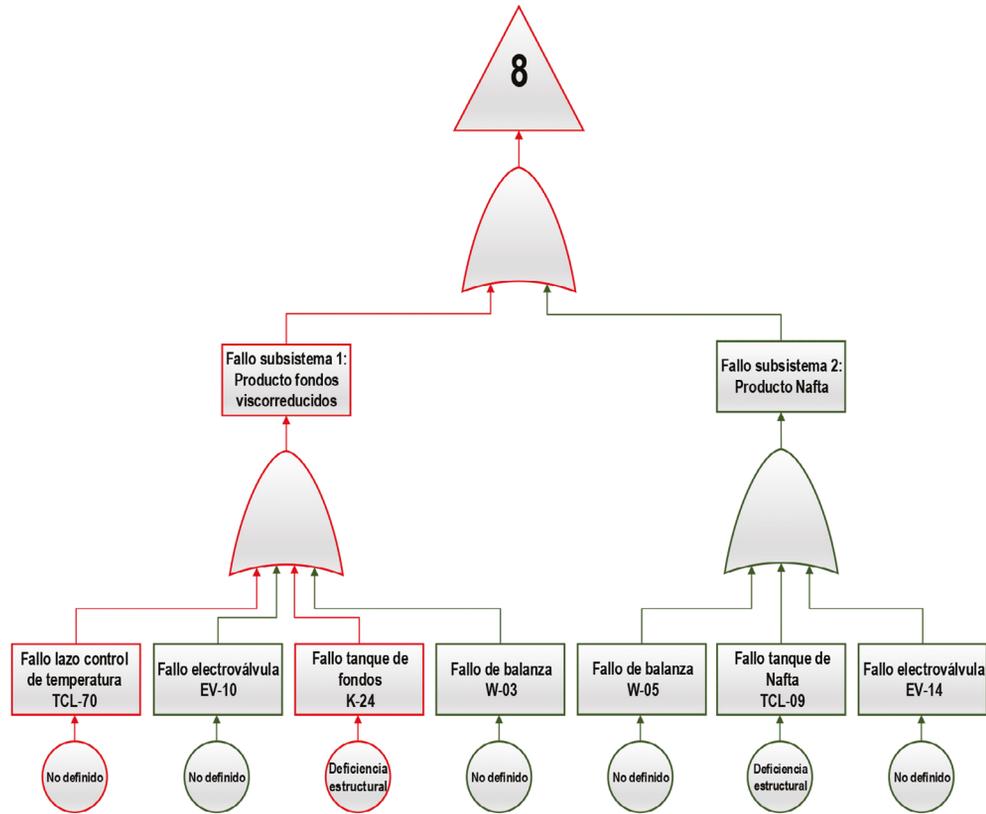


Figura 40. Árbol de fallo sistema de separación



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Figura 41. Árbol de fallo sistema de producto

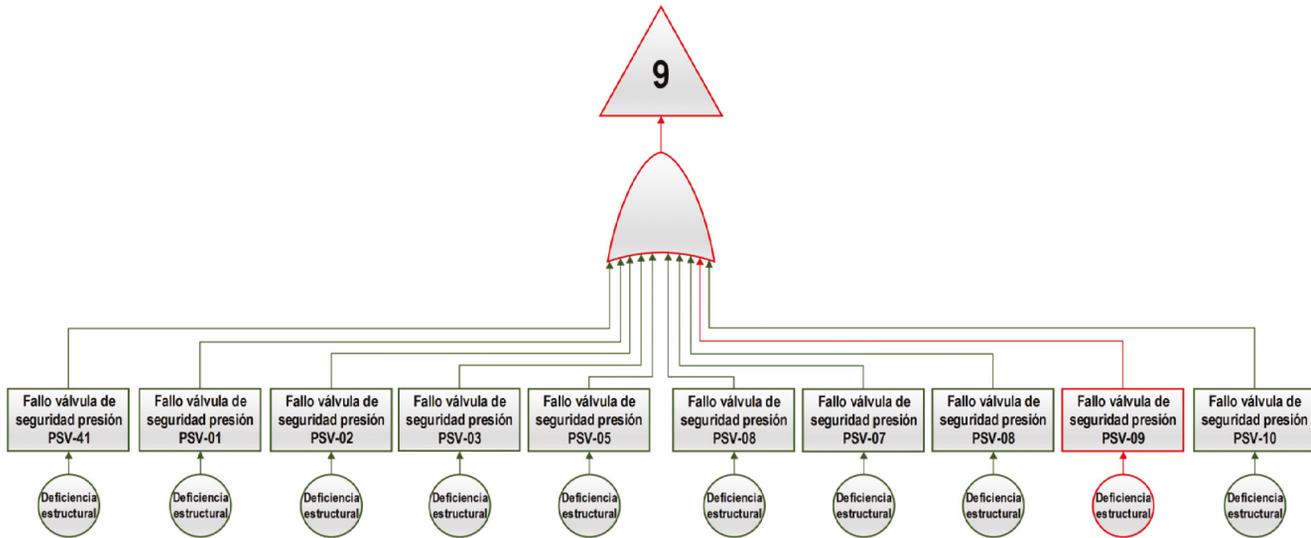


Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]





Figura 42. Árbol de fallo sistema de alivio de presión



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para Plantas Piloto. [39]



Para la Planta de Procesos Térmicos se tienen en cuenta los siguientes nodos (ver Tabla 30).

Tabla 30. Nodos asociados a la Planta Piloto de Procesos Térmicos

Nodo	Sistemas	TAG
1	Sección de carga	D-01 y D-02, Tanques de carga, Bombas, Sistemas de adición de aditivos
2	Sistema de reacción	H-01, Reactor, Horno, Termopozos, Líneas, Bypasses
3	Sistema de separación	D-04, Separador, Tanques de fondos
4	Sistema de condensación y sistema de gases	D-07, Condensador

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Y los siguientes eventos peligrosos (ver Tabla 31).

- Derrames.
- Explosión o incendio por puntos calientes generados por fugas de hidrógeno o vapores de hidrocarburo.
- Fuga de material tóxico (H₂S o catalizador en polvo).

Nivel de riesgos	
Muy alto	
Alto	
Medio	
Bajo	

Tabla 31. Eventos peligrosos para los nodos de la Planta Piloto de Procesos Térmicos

Nodo	Evento peligroso	Variable	Ítem
Carga	Fuga de material tóxico Explosión o incendio	Presión: más	1.1.1
			1.1.3
			1.1.4
			1.1.6
			1.1.7
	Explosión o incendio	Presión: menos	1.2.2
			1.2.3
Explosión o incendio	Temperatura: más	1.3.2	
		Fuga de material tóxico Explosión o incendio	Temperatura: más
Reacción	Fuga de material tóxico Explosión o incendio	Presión: más	2.1.1
			2.1.3
			2.1.4
			2.1.6

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39].

Conclusiones

Se realizaron los diagramas de bloques de fiabilidad para una planta piloto de procesos térmicos, donde se definieron un total de 9 sistemas; además, se construyeron los árboles de fallo, donde según las rutas críticas de fallo que afectan tanto los equipos como la seguridad del personal, el 24.74% de los equipos son críticos.

Después de establecer las ecuaciones que integran la fiabilidad por sistemas de la planta y determinar la magnitud de confiabilidad para cada sistema/subsistema, se puede concluir que a 6 meses el 41.66% de ellos, se encuentra por encima del límite aceptable de fiabilidad, y solo el 8.33% de los sistemas se encuentra por encima del límite aceptable en un periodo de un año; de lo anterior es preciso aclarar que, aunque los valores de fiabilidad total de la planta por modo de operación se encuentran por encima del límite aceptable, la fiabilidad real sigue siendo muy baja, situación que se ve reflejada en los RBDS, lo cual obedece a la configuración de los sistemas y la planta en general la cual es una configuración de equipos en serie, lo que hace que aunque los valores de la fiabilidad aumenten, el hecho de no tener un equipo de respaldo en caso de que alguno falle, es decir, una configuración en paralelo, la fiabilidad de la planta siempre tenderá a ser baja y, por ende, la probabilidad de parada (falla) de la planta es más alta.

Adicionalmente, se establecieron equipos críticos según las rutas críticas, los equipos que afectan la seguridad de la planta y según la fiabilidad de los sistemas que afectan dicha fiabilidad, de lo cual se puede concluir que el porcentaje de equipos críticos según la fiabilidad es menor que el porcentaje de equipos de las rutas críticas: 11.70% vs 24.74%, respectivamente para la planta piloto de procesos térmicos.



Capítulo 4

Planeación de recursos humanos y materiales



4.1 Introducción

Determinar la cantidad óptima de recursos humanos y materiales para atender las demandas de mantenimiento forma parte de la planeación de la capacidad del mantenimiento en una organización. Esto implica identificar las habilidades de los mantenedores y la cantidad conveniente para cada categoría de mantenedor [5]. Por lo anterior, las técnicas para la planeación de la capacidad juegan un rol muy importante a la hora de abordar esta desafiante y compleja tarea.

La cantidad de recurso humano para las tareas de mantenimiento puede estimarse con funciones matemáticas de líneas de espera. La teoría de colas ofrece una variedad de modelos matemáticos para representar el funcionamiento de sistemas en donde varios agentes (personas, máquinas, productos, trabajos, entre otros) llegan al sistema (conformado por la fila y los servidores) para demandar un servicio a otros agentes servidores (personas o máquinas). Los tiempos promedio de espera y la cantidad promedio de los agentes demandantes en espera del servicio pueden calcularse según la tasa de llegada de estos y la tasa de atención de los agentes servidores. En el contexto del mantenimiento, los equipos entran al sistema de servicio de acuerdo con sus tasas de falla y quedan en espera de ser intervenidos por el personal mantenedor.

En cuanto a la administración de inventarios de repuestos (recursos materiales), Hu, Boylan, Chen, & Labib [60], afirman que son comúnmente considerados como casos especiales, pues sus características particulares hacen que sean más difíciles de gestionar. Los repuestos se necesitan cuando el componente o equipo falla, se daña o se desgasta. Esta dependencia a los equipos se vuelve más desafiante según la cantidad y la criticidad de los repuestos dentro de cierto equipo y, consecuentemente, la criticidad del equipo con relación al sistema.

En este capítulo se abordarán los modelos de líneas de espera y de inventarios para soportar la decisión relacionada con la cantidad del recurso humano, tiempo de la tarea de mantenimiento y materiales

necesarios, obtenidos por los modelos de optimización para la implementación del plan de mantenimiento a partir de los parámetros de fiabilidad del sistema.

4.2 Algoritmos de asignación de recursos humanos: modelos de líneas de espera

La teoría de colas es el método de analizar y resolver el problema debido a los retrasos en el tiempo de espera en la línea de espera. La teoría examinará el componente de la línea de espera, como el tiempo de servicio, el tiempo entre llegadas de los agentes que demandan un servicio (o clientes), la capacidad de aglomeración de agentes en el sistema, la cantidad de servidores, e indicadores como tiempo promedio de espera y cantidad promedio de agentes en el sistema. La teoría de colas se utiliza para mejorar la atención de los agentes demandantes (personas, máquinas, productos, trabajos) por parte del mecanismo de servicio (personas o máquinas), reduciendo los tiempos de espera de los clientes de la manera más eficiente.

La integralidad de las situaciones en cola es la idea de incertidumbre en los tiempos de llegada y los tiempos de servicio. Esto significa que la probabilidad y las estadísticas son necesarias para analizar las situaciones de colas. Los modelos matemáticos para representar los sistemas de líneas de espera comprenden los siguientes parámetros de entrada:

- $E [T]$: media del tiempo entre llegadas
- λ : tasa de llegada media $\frac{1}{E [T]}$
- $E [t]$: media del tiempo de servicio
- μ : tasa de servicio media por servidor $\frac{1}{E [t]}$
- m : cantidad de servidores o canales.



Y los siguientes parámetros de salida:

- L : Cantidad promedio de clientes o unidades en el sistema.
- L_q : Cantidad promedio de clientes o unidades en la cola.
- W : Tiempo promedio de un cliente o unidad en el sistema.
- W_q : Tiempo promedio de un cliente o unidad en espera de ser atendido.
- ρ : Factor de utilización del mecanismo de servicio.
- P_n : Probabilidad de n clientes o unidades en el sistema.

En la notación Kendall, $A/B/m/K/N/P$, muchas veces se omiten los últimos miembros, por lo que la notación se convierte en $A/B/m$, pues por defecto se asume que no hay restricción en la capacidad del sistema (K) la población (N) es infinita y la disciplina de servicio es FIFO (primero en entrar, primero en salir). En cuanto a las posiciones A y B en la notación, las distribuciones de probabilidad de las llegadas o del servicio se definen con las siguientes abreviaturas:

- GI : ley general independiente.
- G : ley general.
- M : (para Markov): ley de Poisson o ley exponencial.
- E_k : la ley de Erlang del parámetro k .
- H_k : ley hiperexponencial del orden k .
- D : (para determinista): ley uniforme.

4.2.1 Modelos de líneas de espera con distribuciones markovianas (Poisson y exponencial)

En estos modelos se parte del supuesto de que las llegadas son independientes de las llegadas anteriores, pero su número promedio (la tasa de llegadas) no cambia a lo largo del tiempo. Se describen con una distribución de probabilidad de Poisson.

Los tiempos de servicio también varían de un cliente al siguiente y son independientes entre sí, pero se conoce su tasa promedio y ocurren de acuerdo con una distribución de probabilidad exponencial. En el caso que el mecanismo de servicio sea multicanal, los servidores funcionan al mismo ritmo, por tanto, los tiempos promedio de servicio de los diferentes servidores son iguales y también están distribuidos de forma exponencial.

4.2.2 Modelos de líneas de espera con distribuciones no markovianas

4.2.2.1 Modelos con llegadas de Poisson y tiempo de servicio no exponencial

Existen situaciones en las que las tasas de servicio constante aceleran el proceso en comparación con los tiempos de servicio exponencialmente. Para el caso en el que los clientes o los equipos se procesan de acuerdo con un ciclo fijo (determinista, D), como en el caso de un lavado de autos automático o el de un juego en un parque de diversiones, las tasas de servicio constante son adecuadas. En términos generales, tanto la longitud promedio de la cola como el tiempo de espera promedio en la cola disminuyen a la mitad con el modelo de tasa de servicio constante.

En caso que no se defina una distribución de probabilidad pero sí se evidencia una variabilidad en el proceso de servicio, solo es necesario conocer (o estimar) la media del tiempo de servicio $1/\mu$ y la variancia σ^2 para la distribución general (G). Cualquier sistema de líneas de espera de este tipo podrá alcanzar, en algún momento, una condición de estado estable si $\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$.



Cuando el servicio consiste básicamente en la misma tarea rutinaria que el servidor realiza para todos los clientes, tiende a haber poca variación en el tiempo de servicio que se requiere. Muchas veces el modelo M/D/m proporciona una representación razonable de este tipo de situaciones porque supone que todos los tiempos de servicio son iguales a una constante fija (distribución de tiempos de servicio degenerada) y que tiene un proceso de entradas de Poisson con tasa media de llegadas fija λ . Cuando solo se tiene un servidor, el modelo M/D/1 es un caso especial del modelo M/G/1, donde $\sigma^2 = 0$.

4.2.2.2 Modelos sin llegadas de *Poisson* y tiempo de servicio exponencial

Se dispone de tres modelos de este tipo siempre que los tiempos de servicio tengan distribución exponencial con un parámetro fijo. Estos modelos se obtienen al invertir las distribuciones supuestas de tiempos entre llegadas y tiempos de servicio de los modelos anteriores, donde m es el número de canales.

El primero de ellos (GI/M/m) no impone restricciones sobre el tipo de distribución de los tiempos entre llegadas. En este caso se obtienen algunos resultados de estado estable (en especial sobre las distribuciones de tiempos de espera) de las dos versiones del modelo de uno y varios servidores, pero no son ni cercanamente tan convenientes como las expresiones sencillas del modelo M/G/1.

El segundo modelo (D/M/m) supone que todos los tiempos entre llegadas son iguales a una constante fija, que representaría un sistema de colas en el que se programan las llegadas a intervalos regulares.

El tercer modelo (Ek/M/m) supone una distribución de Erlang de los tiempos entre llegadas que maneja el espacio intermedio entre llegadas regulares programadas (constante) y completamente aleatorias (exponencial).

4.2.2.3 Modelos sin llegadas de *Poisson* y tiempo de servicio no exponencial

Es el modelo conocido como G/G/m. Una de las características de la distribución exponencial tanto del tiempo entre llegadas, $E [T]$, como del tiempo de servicio, $E [t]$, es que el coeficiente de variación CV es igual a 1.

$$CV_T = \frac{\sigma_T}{E[T]} = \frac{\sigma_T}{1/\lambda} = 1$$

Ecuación 33

$$CV_t = \frac{\sigma_t}{E[t]} = \frac{\sigma_t}{1/\mu} = 1$$

Donde σ^2 es la desviación estándar del tiempo entre llegadas, y σ^t , la desviación estándar del tiempo de servicio. Las varianzas serían σ_T^2 y, σ_t^2 respectivamente.

Si estos tiempos no se distribuyen de manera exponencial, pero el coeficiente de variación se acerca a 1, entonces el modelo M/M/m se podría utilizar como una aproximación adecuada. No obstante, si el CV es significativamente distinto a 1, el M/M/m podría subestimar o sobrestimar el tiempo de espera promedio W_q . En este caso se utiliza la aproximación propuesta por Allen-Cunneen, que arroja una cota superior:

$$W_q = (G/G/m) \approx \left(\frac{\lambda^2 \sigma_T^2 + \mu^2 \sigma_t^2}{2} \right) W_{q,(M/M/m)}$$

Ecuación 34

$$W_{q,(M/M/m)} = \frac{\left[\frac{\lambda \mu \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m}{(m-1)! (m\mu - \lambda)^2} P_0 + \frac{\lambda}{\mu} \right] \cdot \frac{\lambda}{\mu}}{\lambda}$$

Ecuación 35

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{m-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] + \frac{1}{m!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^m \frac{m\mu}{m\mu - \lambda}}$$

Ecuación 36



- El factor de utilización del sistema, ρ (la letra griega rho); es decir, la probabilidad de que se esté utilizando la instalación de servicio:

$$\rho = \min \left(1, \left(\frac{\lambda/\mu}{m} \right) \right) \quad \text{Ecuación 37}$$

- El número promedio de clientes en la cola.

$$L_q = si \left(\rho < 1, \frac{\lambda \cdot (\lambda^2 \sigma_r^2 + \mu^2 \sigma_t^2) \cdot \rho}{2 \cdot m \cdot \mu \cdot (1 - \rho)}, \infty \right) \quad \text{Ecuación 38}$$

- Número promedio de clientes o unidades en el sistema.

$$L = si \left(\rho < 1, L_q + \frac{\lambda}{\mu}, \infty \right) \quad \text{Ecuación 39}$$

- El tiempo promedio que pasa un cliente esperando en la cola.

$$W_q = si \left(\rho < 1, \frac{L_q}{\lambda}, \infty \right) \quad \text{Ecuación 40}$$

- Tiempo promedio que un cliente pasa en el sistema.

$$W = si \left(\rho < 1, W_q + \frac{1}{\mu}, \infty \right) \quad \text{Ecuación 41}$$

4.2.3 Revisión de literatura, modelos de líneas de espera y mantenimiento preventivo

Con el fin de identificar y resumir la literatura disponible sobre las políticas de línea de espera basadas en el mantenimiento preventivo, se realizó una revisión sistemática mediante la búsqueda de las siguientes palabras clave en los resúmenes, palabras clave y títulos de los artículos: "*preventive maintenance*" y "*queuing*", en las bases

de datos de Scopus y Web of Science. Los documentos resultantes fueron filtrados en una metodología sistemática como sigue:

- Exclusión de áreas no representativas como medicina, ciencias sociales, artes y humanidades. Las principales áreas temáticas relevantes son ingeniería, matemáticas, ciencias de la decisión y gestión empresarial.
- Revisión de los títulos y resúmenes para excluir artículos que no incluyan optimización de simulación en el mantenimiento.
- Revisión todo el documento para conocer el área de aplicación, los métodos y procesos estudiados. Esto generalmente se obtenía leyendo la sección de metodología del documento.
- Lectura exhaustiva adicional se realizó a través de los documentos completos que arrojaron 12 artículos después de eliminar las duplicaciones.

Del método aplicado en la revisión, resultaron 12 artículos. La revista "*Queueing Systems*" es especializada en los problemas de línea de espera, pero muy pocos estudios fueron realizados sobre sistemas en los cuales se aplica un mantenimiento preventivo.

En lo que respecta a las distribuciones de probabilidad considerados en los modelos, en la mayoría de los artículos se utiliza la distribución Poisson/exponencial (M), el 83% de los casos para los tiempos entre llegadas y el 67% para el tiempo de servicio. En los sistemas en los que se utilizan otras distribuciones de probabilidad (G) generalmente se asocian al tiempo de servicio, en donde el 50% de los artículos utilizaron el modelo M/G y el 17% el G/G. En cuanto el número de servidores, solo el 15% de los artículos consideraron un sistema de servidores múltiples.

El modelo más común en la literatura, bajo el criterio de mantenimiento preventivo y líneas de espera, es el M/G/1 (ver Tabla 32). En las situaciones en donde la distribución de probabilidad de los tiempos entre llegadas y del tiempo de servicio no se comportan



como una variable aleatoria markoviana (M), el sistema de líneas de espera más apropiado es el G/G/s. En este modelo la distribución es general tanto para los tiempos de llegada como los tiempos de proceso, con un mecanismo de servicio de múltiples servidores.

Tabla 32. Modelos de línea de espera en la literatura

Autores	Modelo	
	Servidor simple	Servidores múltiples
Co and Araar [61]	M/G/1	
Koyanagi and Kawai [62]	M/G/1	
Aissani et al. [63]	M/G/1	
Hsu and Tapiero [64]	M/G/1	
Hasenbein et al. [65]	M/G/1	
Wang et al. [66]	M/G/1	
Koyanagi and Kawai [67]	M/M/1	
Aksoy and Gupta [68]	M/M/1	
Dohi et al. [69]	M/M/1	
Ohshimo and Osaki [70]	M/M/1	M/M/2
Shin et al. (2016)		G/G/s
Lei et al (2009)	G/G/1	G/G/s

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1 Conclusiones de la revisión

El objetivo de esta sección es revisar el estado de la técnica en la modelización de líneas de espera aplicado a un mantenimiento preventivo mediante la clasificación sistemática de la literatura publicada, la descripción de las brechas de investigación y la orientación de la investigación futura. La modelización de líneas de espera se ha aplicado con éxito a las operaciones de mantenimiento preventivo. A pesar de la investigación limitada en este campo en desarrollo, parece tener un alto potencial, ya que permite analizar y optimizar sistemas complejos. La investigación en esta área se enfoca principalmente en los sistemas de un solo servidor. El estudio de sistemas complejos con varios servidores sería un tema de investigación

y de desarrollo muy importante en el futuro. Se encontró también que los modelos con una distribución del tiempo de servicio y del tiempo de llegada caracterizado por ley de Poisson son los más comunes. El modelo de línea de espera aplicado a un mantenimiento preventivo más utilizado es el M/G/1; sin embargo, cuando los tiempos entre llegadas y los tiempos de servicio no se apegan a una variable aleatoria no exponencial, el sistema de líneas de espera más apropiado es el G/G/m.

4.3 Algoritmos de asignación de recursos materiales: Modelos de Inventarios

El inventario es uno de los activos más importantes de la empresa y se usa en razón a que las empresas raramente pueden predecir con exactitud el nivel de las ventas, tiempo de producción, demanda etc. Por lo tanto, los inventarios sirven de colchón en caso de que se llegue a necesitar en un momento incierto, ya sea para un cliente o para la misma empresa [71]. Por lo general las empresas realizan el siguiente proceso, para la administración de inventarios, mostrado en la Figura 43.

Figura 43. Proceso típico para los modelos de inventarios



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el mantenimiento es una actividad de servicio dinámica que tiene como objetivo garantizar la disponibilidad de los equipos de la empresa. La sustitución de bloques es una política de mantenimiento preventivo en la que un gran número de los artículos



de bajo costo se reemplaza grupalmente después de ciertos intervalos de tiempo.

El mantenimiento preventivo de los componentes operativos se basa en el supuesto de que cuesta más llevar a cabo una reparación o sustitución en el momento del fallo que hacer lo mismo en un momento predeterminado. La disponibilidad de piezas de repuesto es un factor importante en la empresa, ya que puede aumentar el rendimiento y la eficacia del sistema. Si el sistema falla, el tiempo de inactividad se puede reducir si todas las piezas de repuesto que se necesitan para reparar el sistema están disponibles de inmediato [72]. En el caso contrario, si las piezas de repuesto no están disponibles de inmediato, su tiempo de espera puede causar pérdidas significativas en el costo producción. Para superar este problema, se tienen inventarios de repuestos que permitan la rápida sustitución de componente en fallo y garantizar la continuidad del proceso productivo; sin embargo, los costos de mantenimiento de estos inventarios de piezas de repuesto son altos y pueden aumentar significativamente el costo de los productos o servicios ofrecidos a los clientes.

Existe una amplia variedad de modelos de gestión de inventario; no obstante, la gestión del inventario de piezas de repuesto sigue siendo un gran desafío para muchas organizaciones debido a que los repuestos tienen características que los diferencian de otros productos [73]. Una de las características es el comportamiento de la demanda de repuestos, la cual responde a la tasa de falla del equipo. Esta tasa puede predecirse a partir de históricos de los usos de repuestos anteriores. Adicionalmente, los costos de mantenimiento deben incluir el costo de la disponibilidad de piezas de repuesto.

En las últimas décadas, la gestión del inventario de piezas de repuesto ha adquirido gran interés para optimizar el inventario de repuestos [74] [75]. En el caso de las grandes organizaciones, el manejo de un inventario se traduce a un costo de millones de dólares, por lo que el objetivo de los modelos de inventarios es minimizar los costos totales, es decir, determinar de manera racional cuánto

y cuándo ordenar. El costo total de una política de inventarios se compone de:

- Costo por la compra de una unidad de inventario.
- Costos fijos de preparación o de puesta de pedido, no dependen de la cantidad.
- Costo asociado con el almacenamiento del inventario hasta que se vende o se usa; puede incluir costos de capital invertido en inventario, seguros, utilización del espacio, entre otros.
- Costos de penalización por faltantes o demanda insatisfecha, que significan una pérdida potencial de ingresos o pérdida de competitividad. En un contexto de mantenimiento se relaciona con los costos de indisponibilidad o por la interrupción de la producción.

Los modelos de inventario se definen según el sistema de revisión y el comportamiento de la demanda. Con respecto al primero, existen dos formas: la revisión periódica, en donde el nivel de inventario se revisa en intervalos regulares de tiempo; por ejemplo, cada semana o cada mes, y se ordena si la cantidad está por debajo de cierto nivel al momento de la revisión; la revisión continua, en la cual se ordena apenas la cantidad de inventario disponible, alcanza un nivel mínimo establecido para realizar el pedido. En cuanto al segundo, depende de la naturaleza variable y aleatoria de la demanda por lo que se pueden asumir cuatro tipos: determinístico y constante (estático) con el tiempo; determinístico y variable (dinámico) con el tiempo; probabilístico y estacionario a lo largo del tiempo; y probabilístico y no estacionario a lo largo del tiempo.

4.3.1 *Modelos de inventarios determinísticos cantidad económica de pedido (EOQ)*

El modelo EOQ clásico implica una demanda de tasa constante con reposición de pedidos instantánea y sin escasez. Cuando el inventario llega a un nivel cero, se recibe al instante un pedido de n unidades de tamaño. En la realidad, el pedido no siempre se recibe en



el instante que se pide; por lo tanto, existe un *tiempo de espera (o anticipación)* que hay entre la orden y el momento en el que recibe el pedido. En este caso se define un *punto de reorden*, que es la cantidad mínima de inventario disponible que se alcanza en un momento dado, instante en el cual se realiza el pedido para poder cubrir la demanda mientras llegan las cantidades ordenadas. Por su naturaleza determinística, en la cual no se considera la demanda como una variable aleatoria, en el momento que el inventario llega al nivel cero, inmediatamente después se eleva el nivel de inventario a la cantidad ordenada. La política óptima está determinada por el punto mínimo de la función de costos totales de compra, fijo de puesta de pedido y de almacenamiento, sin incluir los costos por penalización de faltantes.

4.3.2 Modelos de inventarios probabilísticos

A diferencia de los determinísticos, se establece un inventario de seguridad que son unas unidades de reserva para amortiguar la naturaleza aleatoria de la demanda, ya que el momento crítico del inventario se encuentra en el periodo entre la puesta del pedido y la recepción de este, en cuyo lapso ocurren los faltantes. Debido a que el nivel de inventario disponible mientras llega el pedido, definido como punto de reorden, no es suficiente para cubrir las cantidades que superan la media de la demanda durante el tiempo de recepción del pedido, se mantienen existencias de seguridad constantes que eviten la probabilidad de faltantes.

Los modelos probabilísticos para definir la política de inventarios, pueden variar dependiendo del sistema de revisión. La demanda de un repuesto se genera por dos vías. La primera, es a través de las fallas en los equipos entre los periodos de inspección; la segunda, en cada momento en el que se realiza la inspección y las partes defectuosas se reemplazan. La demanda de repuestos se satisface mediante el inventario disponible o expidiendo una orden de compra [76]. La Tabla 33 relaciona algunos modelos según el sistema de revisión, en donde se muestra que las órdenes se ponen en los puntos A, C, E y G; por ejemplo, y llegan en los puntos B, D, F y H respectivamente, después de un tiempo de espera, L .

Tabla 33. Modelos de inventario según el sistema de revisión

Sistema de revisión periódica	Sistema de revisión continua
<p>(R, S), donde cada R unidades de tiempo (el período de revisión) se pone una orden para elevar la posición del inventario al nivel S.</p>	<p>(s, S), donde se pone una orden para elevar la posición del inventario al nivel S cuando la posición del inventario cae al nivel s o por debajo de él.</p>
<p>(R, s, S), donde cada R unidades de tiempo (el período de revisión) se verifica la posición del inventario, si está en o por debajo de s, se pone una orden para elevar la posición del inventario al nivel S.</p>	<p>(S-1, S), es un caso especial de la política (s, S), donde $s=S-1$. Cada vez que se utiliza una unidad del inventario máximo S, se ordena una cantidad hasta completar el valor S de unidades en existencia.</p>
	<p>(s, Q), donde las unidades Q se ordenan cuando la posición del inventario cae al nivel s o por debajo de él.</p>



4.3.2.1 Modelo (S-1, S)

El objetivo en los inventarios de mantenimiento es lograr un balance entre el costo de almacenamiento de material y repuestos y el costo de tiempo de inactividad [5]. Los costos totales de mantenimiento contienen los costos de labor de mantenimiento, los costos de los materiales y repuestos requeridos y el costo del tiempo de inactividad de la producción cuando ocurre la avería. Si la inversión en materiales y repuestos es excesiva, aumentan los costos de capital y de mantenimiento; por otro lado, si los repuestos y materiales necesarios para reparar un equipo no están disponibles cuando se necesitan, el costo de tiempo de inactividad aumentará enormemente.

En este modelo se parte de la premisa de que cada vez que el nivel de inventario cae en una unidad, ya sea debido a una demanda o a una falla, se vuelve a ordenar un artículo. La política de inventario $(S-1, S)$ [7], también llamada *stock-base*, resulta conveniente utilizar cuando las unidades de inventario, o piezas de repuesto, tienen un costo de compra alto y el tiempo de vida útil es mayor que el tiempo de reabastecimiento.

Se busca determinar el inventario máximo de repuestos S , considerando una demanda aleatoria en términos de la tasa de falla de la pieza por unidad tiempo λ . Si la pieza falla, entonces se toma una unidad del inventario para reemplazarla y, a su vez, se realiza la orden de reabastecimiento para completar el valor S . El tiempo de espera de llegada del pedido se asume con una distribución de probabilidad general y con una media t . Si el stock nominal S se agota antes de que se reciban los reemplazos, se incurre en un costo de penalización L por cada demanda que debe ser ocupada por una emergencia orden o perdido debido a la escasez. Se incurre en un costo de mantenimiento h que se asume como una tasa fija por unidad de tiempo para cada artículo almacenado.

Para este sistema de inventarios se utilizan unas probabilidades de estado estable conocidas como distribución de Poisson truncada, donde $Q_s(j)$ es la probabilidad de tener j unidades en inventario dado un nivel deseado S de existencias.

$$Q_s(j) = \frac{(\lambda\tau)^{S-j}}{(S-j)!} \bigg/ \sum_{j=0}^S \frac{(\lambda\tau)^j}{j!} \quad ; j = 0, 1, 2, \dots, S. \quad \text{Ecuación 42}$$

El costo total esperado por unidad de tiempo $TC(S)$ en estado estable, dado un deseado nivel de existencias S , es la suma del costo promedio de mantenimiento y el costo promedio de penalización.

$$TC(S) = h \cdot [S \cdot (1 - p(S)) \cdot \lambda\tau] + \lambda Lp(S) \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde $p(S)$ es la probabilidad de que hayan $j = 0$ unidades de partes en inventario considerando un nivel S de existencias.

$$p(S) = Q_s(0) = (\lambda\tau)^S / S! \quad \text{Ecuación 44}$$

S^* se obtiene resolviendo

$$\frac{dTC(S)}{dS} = 0 \quad \text{for} \quad S = S^* \quad \text{Ecuación 45}$$

Una aproximación de S^* viene dada por

$$S^* = \lambda\tau + \alpha\sqrt{\lambda\tau} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde

$$\alpha = \left[2 \ln \left(1 + \frac{L}{h\tau} \right) \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 47}$$

4.3.3 Revisión de literatura modelo de inventarios y mantenimiento preventivo

En esta sección se relacionan los resultados de la revisión de literatura que trata de políticas de inventario basadas en mantenimiento preventivo. La metodología de investigación de esta revisión es similar a la presentada por Alrabghi y Tiwari [77]. Una investigación sistemática fue realizada por medio de la búsqueda de los términos "preventive maintenance", "spare parts" y "inventory policy" en los



títulos, resúmenes y palabras clave. La búsqueda se hizo en las bases de datos Scopus y Web of Science, dos de las más grandes de la literatura revisada por pares, con el fin de determinar los artículos que corresponden.

Los documentos resultantes fueron filtrados en una metodología sistemática como sigue:

- Exclusión de áreas no representativas como ciencias sociales, biología y artes. Las principales áreas temáticas relevantes son ingeniería, matemáticas, ciencias de la decisión y gestión empresarial.
- Revisión de los títulos y resúmenes para excluir los artículos que no incluyan optimización de simulación en el mantenimiento.
- Lectura del documento completo para determinar el área de aplicación, con especial atención en la metodología.

Del método aplicado en la revisión, se seleccionaron 26 documentos publicados en revistas internacionales que cumplían los tres criterios. La revista *European Journal of Operational Research* es la que tiene más artículos asociados a la ecuación de búsqueda, seguida por el *Reliability Engineering and System Safety*.

La elección del modelo a utilizar para simular su problema depende del sistema y de los criterios de optimización. Los factores que pueden influenciar la toma de decisión son el tipo de mantenimiento, el tipo de política de inventario (periódico o continuo), si el sistema es simple o múltiple y las variables de decisión como el costo de inventario o de mantenimiento, el costo total, la disponibilidad del sistema o la producción. Zahedi-Hosseini, Scarf & Syntetos [76], presentan una clasificación de los artículos revisados por Van Horenbeek [78], en la cual se relacionan varias políticas de inventario de revisión periódica y continua (ver Tabla 34).

El modelo $R, S, T=2R$ era el más adaptado a su problema de fábrica de papel aplicado al repuesto de los rodamientos de bolas para

minimizar el costo total [79]. Otros como Panagiotidou [80] aplicó el modelo (R, S). Sin embargo, el modelo (s, S) es el modelo seleccionado por la mayoría de los estudios, parece convenir y estar adaptado a una gran proporción de casos.

Tabla 34. Características de los modelos publicados

Autores	Política de mantenimiento		Política de abastecimiento		Tipo de modelo desarrollado		Componentes en el sistema	
	Basado en la edad	Basado en bloques	Revisión periódica	Revisión continua	Análítico	Simulación	Simple	Múltiple
Sarker and Haque [81]		Periódico		(s,S)		*		*
Chelbi and Ait-Kadi [82]		Periódico	(R,S)		*			*
Yoo et al. [83]		Periódico	(R,S)		*			*
Brezavscek and Hudoklin [74]		Periódico	*		*			*
Vaughan [84]		Inspección		(s,S)	*			*
Ilgin and Tunali [85]		Periódico		(s,S)		*		*
Huang et al. [86]		Periódico	*		*			*
De Smidt-Destombes et al. [87]		Periódico	*		*		*	
Wang [88]		·Inspección(DTM)	(R,s,Q)		*			*
Wang [89]		·Inspección(DTM)	(R,s,Q)		*			.
Chen et al. [90]	*			(s,Q)	*			.
Panagiotidou [80]		Inspección	(R,S)	(s,S)	*			.
Gan et al. [91]	*		*		*		*	
Jians et al. [92]		Periódico	(R,S)		*			*
Samal and Pratihari [93]		Periódico	*		*			*
Alrabghi and Tiwari [94]		Periódico		(s,Q)		*		*



Ruhul Sarker y Amanul Hake [81] mostraron que la política (S, s, T) es la más efectiva para los casos de optimización conjunta: la política de mantenimiento y de inventario. Esto es posible debido al hecho de que las tres variables de decisión tienen la libertad de interactuar entre sí para generar la solución óptima, al contrario de una política de tipo (S, s) y (T) . Las políticas optimizadas por separado pueden influir en las políticas de mantenimiento o de inventario, pero no en ambas al mismo tiempo.

El modelo de inventario $(S-1, S)$ a menudo se emplea como una política de control de existencias para artículos caros *que se mueven lentamente y también se usa en el control de inventario de piezas de repuesto*. Es un caso especial de la política (s, S) , donde $s=S-1$. Cada vez que se utiliza una unidad del inventario máximo S , se ordena una cantidad hasta completar el valor S de unidades en existencia. En el caso de demandas de tamaño de unidad, se sabe que esta política es óptima en ciertas condiciones para artículos con tiempos de vida infinitos; por lo tanto, debe proporcionar una aproximación razonable a la verdadera política óptima para sus contrapartes de vida finita.

4.3.3.1 Conclusiones de la revisión

La gestión de inventario juega un papel importante en mantener y mejorar la disponibilidad de los activos. Esta investigación informa sobre el estado de las capacidades en la modelización de inventarios basada en las partes de repuestos aplicado a un sistema con mantenimiento preventivo. La modelización de inventarios basada en partes de repuestos fue aplicada con suceso a las operaciones de mantenimiento preventivo. La investigación está limitada en este campo, pero en desarrollo, ya que permite el análisis y la optimización de sistemas complejos. En esta área la investigación se centra en sistemas a escalón simple, deterministas y a revisión continua. Así el modelo (s, S) es el más estudiado. Además, se observan unas optimizaciones las cuales dependen de los objetivos y condiciones del sistema, tal como la utilización de un modelo conjunto tipo (s, S, T) en lugar de (s, S) y (T) o de un modelo tipo $(s, S, T) = kR$ para un mantenimiento basado en bloques. En el 2019 se presenta una

revisión de artículos donde el 71% de los artículos están asociados a múltiples máquinas, el 34% presentan solución analítica y el 43% utiliza la simulación. Finalmente, el modelo de inventario (S-1, S) a menudo se emplea como una política de control de existencias para artículos de alto costo que se mueven lentamente y también se usa en el control de inventario de piezas de repuesto.

4.4 Cantidad de recurso humano, tiempo de la tarea de mantenimiento y materiales necesarios, obtenidos por los modelos de optimización para la implementación del plan de mantenimiento a partir de los parámetros de fiabilidad del sistema

4.4.1 Modelo G/G/m para la asignación de recurso humano

El modelo G/G/m se utilizó para estimar el recurso material con base en las tasas de falla (λ) de los equipos de la planta, que se asume es la tasa de llegada de los equipos al sistema de línea en espera de ser atendidos para su intervención. En caso de ausencia de datos, se puede utilizar la media de las tasas de falla que proporciona la base de datos OREDA para el cálculo de los parámetros de fiabilidad, así como la desviación estándar para determinar el coeficiente de variación de los tiempos entre llegadas. Para ilustrar con un ejemplo, en el OREDA se indica que la bomba recíprocante de una planta piloto, en todos los modos de falla, tiene una distribución Gamma con una media de $30.04/10^6$ y una desviación estándar de $42.49/10^6$. Considerando los parámetros beta ($(30.04/10^6) \div (42.49/10^6)^2$) y alfa ($(30.04/10^6) \div$ beta) de la distribución Gamma, y que un año tiene 8760 horas, la tasa de falla es de 0.000019679328 fallas por hora (alfa / (beta + 8760)).

Por otro lado, la tasa de servicio se calcula como el inverso multiplicativo de la media del tiempo de reparación, cuya fuente principal son los Standar Jobs (SJ) o de la base de datos OREDA. Para el caso demostrativo de la bomba recíprocante, el tiempo de reparación se



estima en 9 horas; por tanto, la tasa de servicio es de $1/9$ reparaciones por hora. La desviación estándar se determina con base en datos históricos si se cuenta con el registro de los tiempos, en caso contrario, en primera instancia se podría asumir con valor cero. A la bomba recíprocante del ejemplo se le asigna un valor de cero a la desviación estándar del tiempo de reparación.

Teniendo en cuenta lo anterior y la Ecuación 33, el coeficiente de variación de los tiempos de llegada de las fallas que demandan servicio de reparación es de 2.000661457; y el coeficiente de variación del tiempo de reparación es cero. En consecuencia, el factor de utilización (Ecuación 37) de un operario que preste el servicio de reparación para la bomba recíprocante es de 0.000177, y el tiempo promedio de espera (Ecuación 34) de la bomba para empezar a ser reparada, por cualquier modo de falla, es de 0.001595 horas. Estos valores tan cercanos a cero indican que se puede asignar máximo un agente servidor (operario de mantenimiento) a la bomba recíprocante para todos sus modos de falla.

Uno de los supuestos en la aplicación de este modelo es que se asigna un operario al 100% de los equipos para realizar la reparación, pues en razón al bajo valor de las tasas de falla se podría generar un mayor tiempo ocioso si se tiene más de un operario por equipo.

Los resultados del modelo G/G/m, aplicado a los equipos reparables de la planta de procesos térmicos, se relacionan en la Tabla 35 la proporción de ocupación del operario reparador (agente servidor) se indica en el factor de utilización, en donde todos los resultados muestran que están lejos de superar el 1%.

Tabla 35. Resultados del modelo G/G/m

Código	Equipo	Factor de utilización por operario	Cantidad recurso humano	Tiempo de reparación (h)	Fuente
W-01	Balanza	0.001538913	1	18 h	Histórico
P-01	Bomba de desplazamiento positivo	0.000177114	1	9 h	SJ #260
E-02	Baño de enfriamiento	0.0000377946	1	9 h	SJ #121
R-01	Reactor	0.0000013402	1	27 h	Histórico
PCV-01	Válvula de Control de Presión	0.0007424386	1	18 h	SJ #1158
PCV-11	Válvula de Control de Presión (regulador)	0.000303725	1	9 h	Histórico
PSV-41	Válvula de Seguridad	0.0000196593	1	9 h	SJ #30
K-14	Tanque de Almacenamiento para Alc	0.000587083	1	27 h	Histórico
K-01 A	Tanque de precalentamiento	0.000587083	1	27 h	Histórico
K-01	Tanque de Carga	0.000587083	1	27 h	Histórico
D-04	Separador	0.000778759	1	7.2 h	OREDA
K-05	Tanque de Fondos	0.000587083	1	27 h	Histórico
D-07	Tambor Condensador	0.004425507	1	43 h	OREDA
D-08	Rectificador de Nafta	0.000587083	1	27 h	Histórico
K-09	Tanque de Nafta	0.000587083	1	27 h	Histórico
D-11	Tambor de Alivio	0.000587083	1	27 h	Histórico
E-01	Intercambiador	0.004425507	1	43 h	OREDA
M-01	Motor Agitador	0.000680763	1	18 h	SJ #1158
M-03	Motor	0.000103546	1	9 h	SJ #771
EV-04	Electroválvula	0.000072	1	4.5 h	Histórico
PDIT-02	Diferencial de Presión	0.00005139	1	9 h	Histórico
LIT-02	Transmisor de Nivel	0.0000147891	1	9 h	Histórico
H-01	Horno	0.0000434876	1	2 h	OREDA

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]



4.4.2 *Diferencia en magnitud en la asignación de recursos entre el plan actual de mantenimiento (Línea base) y la obtenida a través de la optimización de recursos a través del modelado*

Las diferencias encontradas entre el recurso humano optimizado y el recurso humano asignado actualmente en el instituto, se indican en la Tabla 36.

Tabla 36. Comparación entre recurso humano actual y optimizado

Familia de equipos	Cantidad	Cantidad recurso humano optimizado	Cantidad humano actual (fuente: SJ)
Balanza	4	1	No SJ
Baño de enfriamiento	1	1	3
Bomba de desplazamiento positivo	1	1	1
Diferencial de presión	1	1	No SJ
Electroválvula	15	1	No SJ
Horno Calent. Enchaquetado	1	1	No SJ
Intercambiador / Condensador	2	1	No SJ
Motor	1	1	No SJ
Motor agitador	2	1	No especificado en SJ
Reactor	1	1	No SJ
Relé	19	1	No especificado en SJ
Separador	1	1	No SJ
Tanque carga/producto	9	1	No SJ
Termocupla	19	1	No especificado en SJ
Transmisor de nivel	1	1	No SJ
Válvula de control	1	1	No SJ
Válvula de control de presión (regulador)	5	1	No SJ
Válvula de Seguridad	10	1	2

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Se puede observar que los resultados de la optimización de recurso humano son notablemente menores, por lo que se recomienda al Centro de Innovación y Tecnología implementar este modelo para la organización de su recurso humano.

4.4.3 Modelo (S-1, S) para la asignación de recurso material

El modelo de inventarios (S-1,S) se basa en las tasas de falla (λ , fallas/hora) del equipo como el parámetro de comportamiento de la demanda de repuestos para dicho equipo, pues el repuesto se reemplaza en caso de fallo. Al igual como se especificó en el modelo G/G/m, en caso de ausencia de datos, se puede utilizar la media de las tasas de falla que proporciona la base de datos OREDA. Continuando con el ejemplo ilustrativo, la bomba recíprocante tiene una tasa de falla de 0.000019679328 fallas por hora.

El costo de mantener (h) se valora teniendo en cuenta el costo del activo (tomado de la matriz de activos o de la factura de compra del equipo), el cual se multiplica por el 5% anual que representa el costo de oportunidad para un activo no corriente. Entonces, la bomba recíprocante, que tiene un valor de \$28.703.952, tendrá un costo de mantener de \$ 163.84 por hora (un año tiene 8760 horas).

La media del tiempo de aprovisionamiento (t), según fuentes del Centro de Innovación y Tecnología, se estima en promedio de 129 días y es equivalente a 3096 horas.

Finalmente, en el costo de penalización L , definido en la Ecuación 48, se tuvo en cuenta la mano de obra operativa directa (CMO) y el costo del contrato para operar (CCO), resultantes del análisis de costo de ciclo de vida realizado por el Centro de Innovación y Tecnología en la fase instrumental del proyecto de optimización de mantenimiento. Estos costos, al estar especificados en términos anuales, se dividen entre las horas totales anuales, 40 horas/semana multiplicado por las 52 semanas contenidas en un año y luego se multiplica por el tiempo de reparación T . En caso de equipos o repuestos no reparables, en lugar del tiempo de reparación se utiliza el tiempo promedio del aprovisionamiento.



$$L = \frac{(CMO + CCO)}{40 * 52} * T_r \quad \text{Ecuación 48}$$

Si se estima que la bomba recíprocante tiene un costo de mano de obra operativa directa de \$ 52.690.662 anuales, el costo de contrato para operar es de \$ 53.954.799 anuales y el tiempo de reparación es de 9 horas, el costo de penalización resulta en \$ 461.447 por tiempo de reparación, que se traduce en indisponibilidad del equipo mientras se repara. Por tanto, al aplicar la Ecuación 46, la cantidad óptima de inventario (S^*) es de aproximadamente cero.

Dependiendo de los resultados del modelo (S-1,S), se revisa también el parámetro de fiabilidad $R(t)$. En caso de que el valor de S sea cero, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Recomendación 1. Si $R(t) < 85\%$, se recomienda pedir 1 activo independientemente de la tasa de falla que se tenga, a fin de tenerlo disponible en caso de que falle y evitar los costos de penalización por indisponibilidad o paradas.
- Recomendación 2. Si $R(t) \geq 85\%$, se recomienda realizar un mantenimiento e inspección base anualmente para comprobar que el equipo se encuentra en buen estado.

Los resultados del modelo (S-1, S), aplicado a los equipos reparables de la planta de procesos térmicos, se relacionan en la Tabla 37.

Tabla 37. Resultados del modelo (S-1, S) y recomendaciones según fiabilidad

Código	Equipo	Cantidad óptima a pedir	Fiabilidad (R) (1 año)	Recomendación
Equipos reparables				
W-01	Balanza	S=1	47.287%	Aplicar S
P-01	Bomba de desplazamiento positivo	S=0	80.994%	Recomendación 1
E-02	Baño de enfriamiento	S=0	92.778%	Recomendación 2

Continúa...

144 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

Continuación

Código	Equipo	Cantidad óptima a pedir	Fiabilidad (R) (1 año)	Recomendación
R-01	Reactor	S=1	99.971%	Aplicar S
PCV-01	Válvula de Control de Presión	S=1	72.623%	Recomendación 1
PCV-11	Válvula de Control de Presión (regulador)	S=1	72.623%	Aplicar S
PSV-41	Válvula de Seguridad	S=0	94.971%	Recomendación 2
K-14	Tanque de Almacenamiento para Alc	Sin costo de incorporación	98.32%	Recomendación 2
K-01 A	Tanque de precalentamiento	Sin costo de incorporación	98.32%	Recomendación 2
K-01	Tanque de Carga	Sin costo de incorporación	98.32%	Recomendación 2
D-04	Separador	S=1	36.745%	Aplicar S
K-05	Tanque de Fondos	Sin costo de incorporación	98.32%	Recomendación 2
D-07	Tambor Condensador	S=2	39.221%	Aplicar S
D-08	Rectificador de Nafta	S=2	39.221%	Aplicar S
K-09	Tanque de Nafta	Sin costo de incorporación	98.32%	Recomendación 2
D-11	Tambor de Alivio	Sin costo de incorporación	98.32%	Recomendación 2
E-01	Intercambiador	S=2	39.221%	Aplicar S
M-01	Motor Agitador	S=0	70.043%	Recomendación 1
M-03	Motor	S=0	89.355%	Recomendación 2
EV-04	Electroválvula	S=1	86.922%	Aplicar S
PDIT-02	Diferencial de Presión	S=0	95.121%	Recomendación 2
LIT-02	Transmisor de Nivel	S=0	94.880%	Recomendación 1
H-01	Horno	Sin costo de incorporación	91.022%	Recomendación 2
Equipos no reparables				
TT-12	Termocupla	S=2	60.653%	Aplicar S
TY-12	Relé	S=2	83.929%	Aplicar S

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Conclusiones

Los modelos de líneas de espera y los modelos de inventario son útiles para estimar la cantidad adecuada de los recursos humanos y materiales para la planeación del mantenimiento.



De acuerdo con la revisión bibliográfica de los modelos de líneas de espera para el mantenimiento preventivo, el modelo más utilizado es el M/G/1, en los cuales se considera que la tasa de llegadas (fallos) sigue la ley de Poisson (tiempo entre fallos se distribuye exponencial); y el tiempo del servicio (reparación del fallo) tiene una distribución general (G), cuyos parámetros son la media y la desviación estándar. No obstante, para el caso de las plantas piloto del Centro de Innovación y Tecnología, se aplicó el modelo G/G/m porque los tiempos entre fallos no siempre se distribuyen de forma exponencial para todos los equipos y, además, en caso de que sí sean exponenciales, el coeficiente de variación daría 1 y los resultados serían aproximadamente iguales a los modelos con llegadas de comportamiento markoviano (M). Por otro lado, el modelo también se puede generalizar para uno o más agentes servidores ($m \geq 1$), que en el contexto de mantenimiento son los operarios que prestan el servicio de reparación.

El modelo G/G/m se aplicó bajo el supuesto de que se asigna un operario al 100% de los equipos para realizar la reparación y, con base en la fiabilidad, se analizó de manera individual cada equipo con su respectiva tasa de fallo. Los resultados mostraron que el factor de utilización del operario reparador (agente servidor) de los equipos reparables de la planta de procesos térmicos no superan el 1%, por lo que máximo se puede asignar un operario para el servicio de mantenimiento.

Por otro lado, la revisión bibliográfica de los modelos de inventario indica que el modelo con punto de reorden s y nivel máximo de inventario S , (s, S) , es muy usado en el contexto del mantenimiento. Los equipos y piezas de repuesto de las plantas piloto y los laboratorios del Centro de Innovación y Tecnología suelen ser de alto valor, y el tiempo de vida útil es mayor que el tiempo de reabastecimiento, supuestos bajo los cuales resulta muy conveniente aplicar el modelo $(S-1, S)$, que es un caso especial de la política (s, S) , donde $s=S-1$. La demanda de reparación, en todos los modos de falla de cada equipo, es una variable aleatoria que se estima según la tasa de falla, la cual puede ser obtenida de los históricos de fallos registrados

en el sistema de información o de la base de datos OREDA, en caso de insuficientes datos históricos.

Si la cantidad de inventario óptima S^* , arrojada por el modelo (S-1, S), es cero, se revisa en conjunto con el parámetro de fiabilidad $R(t)$ para decidir si se pide un activo sin importar la tasa de falla en razón a la baja fiabilidad ($R(t) < 85\%$), o si se realiza un mantenimiento e inspección base anualmente para comprobar que se encuentre en buen estado para no deteriorar la fiabilidad ($R(t) \geq 85\%$). Este último escenario es el que más predominó en los equipos reparables de la planta de procesos térmicos del Centro de Innovación y Tecnología.



Capítulo 5

Simulación de escenarios de mantenimiento preventivo para una planta piloto de procesos térmicos



5.1 Introducción

Al aumentar la fiabilidad de un sistema a través de la reducción de tiempos de inactividad, paradas, averías y fallas, la programación de actividades de mantenimiento puede mejorar su productividad, eficiencia y calidad. Diversos estudios muestran un efecto positivo del mantenimiento sobre la rentabilidad, la productividad, la eficacia general del equipo, el nivel de servicio, así como el uso eficiente del sistema y del personal [95].

Los equipos tienen básicamente tres estados: en funcionamiento, en reparación y en mantenimiento preventivo. El mantenimiento se define como la combinación de actividades como: reacondicionar, reemplazar, inspeccionar, dar servicio, ajustar, reparar, probar, medir y detectar fallas, etc., para reducir las averías no planificadas del sistema y aumentar el tiempo operativo disponible; para garantizar que el sistema se encuentra en el estado de funcionamiento requerido. Un mantenimiento efectivo puede reducir las consecuencias de las fallas y prolongar la vida útil de un sistema [96].

Las estrategias de mantenimiento se pueden clasificar en dos categorías: mantenimiento correctivo que se lleva a cabo después de una falla y mantenimiento preventivo que realiza actividades antes de la falla de acuerdo con criterios prescritos (mantenimiento basado en la condición) o en intervalos predeterminados (mantenimiento planificado) [95]. Se realiza Mantenimiento Preventivo MP para mantener la estabilidad del equipo, y se utiliza Mantenimiento Correctivo MC para reemplazar o restaurar un equipo a la condición operativa normal, cuando el equipo se descompone.

Cuando una industria promueve la realización de *Reliability Centered Maintenance* RCM, en sus equipos críticos y el *Condition Based Maintenance* CBM no es posible, ya sea porque los equipos no pueden ser monitoreados por sensores o el rendimiento de algunos equipos no se puede monitorear fácilmente, sin interrumpir el funcionamiento del sistema; el MP periódico es una opción para evitar cualquier falla que provoque interrupciones en las operaciones de producción. Por tanto, para asegurar que un sistema continúe

cumpliendo su función prevista en el tiempo, se requiere del establecimiento de una estrategia de planificación del MP a largo plazo dentro de un intervalo de tiempo predeterminado [97].

El MP se introdujo en la década de 1950, después del reconocimiento de la necesidad de prevenir fallas [98]. El MP realizado a intervalos de tiempo es muy frecuente en el mantenimiento de equipos, ya que permite disminuir su probabilidad de fallas, la pérdida causada por la falla del sistema o la degradación del rendimiento. El principio básico del MP es aplicar tareas de mantenimiento predeterminadas que se derivan de las funcionalidades de la máquina o el equipo y la vida útil de los componentes. Estas tareas se planifican para cambiar y/o reparar, los componentes antes de que fallen [99]. Sin embargo, el MP puede presentar problemas como el incremento en el tiempo de inactividad del sistema causado por el deterioro del sistema o de los componentes por acciones imperfectas del MP, falta de materiales para la ejecución de las tareas del MP, estimación incorrecta del tiempo para el MP, indisponibilidad del sistema por un número insuficiente de personal de mantenimiento e interrupciones en los procesos de producción [100] [101] [99]. Estos problemas pueden ser causados por una planificación inadecuada antes de emprender tareas de MP y por la conducta incorrecta del MP en un sistema [102] [103] [99].

La planificación del MP incluye actividades que garanticen para la ejecución de las tareas, los requisitos de materiales, los requisitos de mano de obra, las asignaciones de tiempo y las referencias técnicas relacionadas con el equipo; que se determinan y preparan antes de la realización de una tarea [104]. Además, se debe tener en cuenta la descripción del estado de un sistema (es decir, como sistemas de una sola unidad y de unidades múltiples en serie o en paralelo), su función e importancia.

En este contexto, el análisis esencial de la planificación integral para MP se denomina "MP basado en la planificación". El MP basado en la planificación implica identificar los criterios fundamentales de mantenimiento de los sistemas como base para establecer el intervalo de mantenimiento óptimo, que impacte lo menos posible los



ingresos de operación. Si el intervalo de mantenimiento es demasiado largo, pueden ocurrir más averías y, por lo tanto, pueden afectar directamente el nivel de disponibilidad del equipo. Si el intervalo de mantenimiento es demasiado corto, es decir, el mantenimiento preventivo es demasiado frecuente, el tiempo de mantenimiento ocupará el tiempo de funcionamiento normal. Es por ello que, precisar cómo determinar el MP basado en la planificación adecuado para evitar un mantenimiento excesivo o insuficiente, es un tema crítico. El MP basado en la planificación se clasifica de tres maneras, planificación basada en *costes*, basada en *tiempo* y basada en *fallas* [99].

La planificación MP basada en *costes* analiza el coste de capital y los beneficios para las organizaciones de MP, así como los ingresos que ayuda a generar [105] [99], ya que compara los costes de las soluciones (incluyendo los costes de reparación, reemplazo, repuestos, herramientas y mano de obra) con los beneficios económicos que se obtendrían si la solución se pusiera en práctica.

Se han publicado diversos artículos asociados con el cálculo del intervalo óptimo de MP en términos de coste, utilizando métodos de formulación matemática como la programación dinámica, la programación entera y la programación lineal y no lineal, la programación entera y/o mixta, así como métodos de Inteligencia Artificial IA. Los métodos que se aplican comúnmente en entornos de la IA son el algoritmo genético (GA), la lógica difusa y la cadena de Markov (ver Tabla 38 y Tabla 39). Algunos de los factores de mantenimiento que estuvieron involucrados en los análisis, fueron la tasa de fallas, el costo del sistema y la fiabilidad, [99].

La planificación MP basada en tiempo, implica tomar decisiones utilizando la duración de diferentes tipos de operaciones durante un periodo de tiempo estimado, como: el tiempo dedicado a la reparación y el reemplazo, el tiempo perdido debido a fallas, la asignación de tiempo para recolectar repuestos, tiempos de cambios de turno y tiempos para la operación de un sistema. Algunos de los métodos de formulación matemática de planificación basada en el tiempo son la programación dinámica, entera, lineal, no lineal y mixta. Estos tipos de programación involucran el cálculo de la minimización o

maximización del valor de una función objetivo como el tiempo, bajo un conjunto de restricciones impuestas por la naturaleza del problema que se estudia. En referencia a la literatura sobre los métodos de IA que se han aplicado son: lógica difusa, algoritmos genéticos, búsqueda tabú, análisis bayesiano y heurísticas [99].

Tabla 38. Artículos asociados con el cálculo de intervalo óptimo de MP (Formulación Matemática)

Formulación Matemática		
Referencia	Método / Distribución	Objetivo
Kobbacy, Fawzi, Percy y Ascher [106]	Weibull, normal y distribución gamma	Intervalo óptimo de MP
Vaughan [84]	Programación dinámica	Intervalo óptimo de MP
Darghouth et al. [107]	Función de probabilidad y fiabilidad	Tasa de costo y MP con periodo de garantía
Mijailovic [108]	Weibull y distribución exponencial	Un intervalo de MP óptimo que minimiza el costo por unidad de tiempo
Bartholomew-Biggs et al. [109]	Distribución Weibull	Intervalo óptimo de MP
Vaughan [84]	Programación dinámica	Intervalo óptimo de MP

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Artículos asociados con el cálculo de intervalo óptimo de MP (Inteligencia Artificial)

Inteligencia Artificial (AI)		
Referencia	Método / Distribución	Objetivo
Bris et al. [110]	Técnica de Montecarlo GA	Intervalo óptimo de MP
Lin and Wang [111]	Hybrid GA/RSM como análisis estadístico	Intervalo de MP óptimo basado en la minimización del costo total
Tosun and Kuruözum [112]	Markov Chain	Intervalo óptimo de MP
Panagiotidou and Tagaras [113]	Markov Chain	Intervalo óptimo de MP

Fuente: Elaboración propia.



La planificación MP basada en fallas, implica un análisis que tiene en cuenta la información sobre el deterioro del sistema o de los componentes. Incluye la definición detallada de los modos de fallo que ocurren con los sistemas para garantizar que la MP se lleve a cabo correctamente, reduciendo así las fallas [99].

Algunos artículos que reportan la aplicación de la planificación MP basada en fallas, son el de Ahmad [114], llevó a cabo un estudio de caso sobre un sistema de una sola unidad con un solo componente en una industria de procesamiento. Los autores desarrollaron un modelo de MP que constaba de tres pasos generales que eran la identificación del problema, la evaluación de la condición actual del sistema y la decisión de mantenimiento. Una vez identificados los factores externos y los modos de falla, se evaluó el componente crítico y se estableció el intervalo de MP en el estado actual del sistema mediante un modelo de reemplazo por edad [114]. Por lo tanto, el reemplazo de componentes basado en el intervalo MP para el estado actual del sistema implicó una decisión razonable para mejorar la confiabilidad del sistema. Cicek [115] propuso una metodología de análisis de fallas para la planificación de MP, donde la evaluación se realizó utilizando un modelo de fiabilidad, que permitió el uso de intervalos flexibles entre las intervenciones de mantenimiento; mientras que Khan y Haddara [116] presentaron una nueva metodología de mantenimiento basada en elementos críticos para la toma de decisiones en la planificación de MP al integrar el tema de la fiabilidad con la seguridad y con los problemas ambientales [99].

Finalmente, en la literatura se han sugerido varios métodos y técnicas para establecer planes de mantenimiento; sin embargo, es [79] manifiesta la falta de literatura sobre la comparación y selección de la estrategia de mantenimiento óptimo. Algunos de los retos que se plantean para el futuro, es la necesidad de un análisis detallado de los factores que tienen un impacto significativo en el rendimiento del mantenimiento tanto en un contexto de producción como en los sistemas de productos y servicios; además, de la necesidad de un marco que indica las diferentes estrategias (escenarios) y políticas de mantenimiento en el proceso de experimentación [79].

En este capítulo se presenta una propuesta de escenarios para el MP basado en la planificación, incluyendo en el modelado matemático los tres aspectos mencionados anteriormente: costes (costo de mantenimiento preventivo y correctivo), tiempo (duración de las actividades del mantenimiento) y fallas (función de densidad $f(t)$, la función de distribución $F(t)$ y fiabilidad $R(t)$ del equipo).

5.2 Escenario de Mantenimiento Preventivo basado en: Modelo de minimización de costes basado en el reemplazo preventivo por tiempo (edad constante)

En el modelo de reemplazo preventivo por tiempo, el momento en que ocurre el reemplazo preventivo depende de la antigüedad del artículo. Cuando ocurren fallas, se realizan reemplazos por fallas. Cuando esto ocurre, el reloj se pone a cero y el reemplazo preventivo ocurre solo cuando el artículo ha estado en uso durante el período especificado [117]. El problema es equilibrar el costo de los reemplazos preventivos con sus beneficios, a partir de la determinación de la edad de reemplazo preventiva óptima para el artículo que minimice el costo total esperado de reemplazos por unidad de tiempo [117].

La política de reemplazo consiste en realizar un reemplazo preventivo cuando el artículo ha alcanzado una edad específica, t_p , más reemplazos por fallas cuando sea necesario. El objetivo de la política de reemplazo es determinar la antigüedad óptima de reemplazo del artículo para minimizar el costo de reemplazo total esperado por unidad de tiempo.

Según el modelo de reemplazo preventivo por el tiempo [117] este permite cuantificar el periodo de tiempo de ejecución de mantenimiento en el cual se genera menor coste (coste mínimo por unidad de tiempo). Cuando al aplicar el modelo no se encuentra un mínimo en la curva de costo, es decir, que no exista un t_p en el cual se minimicen los costos, en este caso la ocurrencia al fallo y su fiabilidad permitirá identificar el tiempo en el que se espera el fallo.



A continuación se presenta la ecuación que permite calcular el periodo de tiempo que genera el mínimo coste de mantenimiento de reemplazo preventivo por el tiempo:

$$C(tp) = \frac{Cp \cdot R(tp) + Cf \cdot (1 - R(tp))}{tp \cdot R(tp) + \int_{-\infty}^{tp} t \cdot f(t) dt} = \frac{\text{Unidad monetaria}}{\text{tiempo}} \quad \text{Ecuación 49}$$

Donde:

- Cp : costes por mantenimiento preventivo / planificado (materiales, mano de obra, lucro cesante, seguridad, ambiente, etc.) unidad: dinero.
- Cf : costes por mantenimiento correctivo por fallo (materiales, mano de obra, lucro cesante, seguridad, ambiente, etc.) unidad: dinero.
- Tp : tiempos hasta el fallo TTFi (Unidad en tiempo: horas, días, meses, años, etc.).
- $C(tp)$: coste promedio de la estrategia de mantenimiento de reemplazo preventivo por unidad de tiempo. El periodo de tiempo asociado al valor de coste mínimo encontrado será el momento en el cual se propone ejecutar la actividad de mantenimiento de reemplazo preventivo, ese tiempo se denomina Tp : (tiempo de ejecución del mantenimiento preventivo a coste mínimo).
- $F(tp)$: probabilidad de ocurrencia fallo (unidad en porcentaje).
- $f(tp)$: función de densidad de probabilidad del fallo: $f(x)$.

Donde el Cp costo del mantenimiento preventivo y Cf costo del mantenimiento correctivo, en la cual se viera reflejado el costo del recurso material y recurso humano, calculado en la actividad anterior.

5.2.1 Modelo para el cálculo del costo de mantenimiento preventivo y correctivo

La expresión matemática para calcular el costo del mantenimiento preventivo y costo del mantenimiento correctivo, en la cual se viera reflejado el costo del recurso material y recurso humano, calculado en la actividad anterior, se expresa de la siguiente forma:

$$C_p = N(T_{rp} \cdot C_{hp} \cdot N_{rhp}) \quad \text{Ecuación 50}$$

$$C_f = N(T_{rf} \cdot C_{hf} \cdot N_{rhf}) \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde C_p es el costo del mantenimiento preventivo y C_f es el costo del mantenimiento correctivo, este se calcula solo para tener un remanente económico en el caso de que dicha situación se presente. N es el número de mantenimientos preventivos previstos en un año, según los resultados del modelo de inventario (S-1, s), T_r es el tiempo de reparación/mantenimiento del equipo tomado de OREDA o del Standard Job del equipo. C_{hf} y C_{hp} es el costo hora del personal de mantenimiento correctivo/preventivo. N_{rhp} y N_{rhf} es la cantidad de personal necesario para el mantenimiento preventivo / correctivo.

5.3 Escenarios para el mantenimiento preventivo y su comparación con la línea base de planes de mantenimiento actuales

¿Cuál es la diferencia en magnitud en la asignación de recursos entre el plan actual de mantenimiento (Línea base) y la obtenida a través de la optimización de recursos a través del modelado?

5.3.1 Intervalo entre mantenimientos preventivos

El análisis de costo de mantenimiento y asignación de recurso material solo se pudo realizar para el 90.4% de los equipos de la plan-



ta, esto debido a que no todos los equipos contaban con costo de incorporación establecido y con tiempo de reparación, unas de las entradas primordiales para el análisis. Es importante resaltar que el análisis para establecer la frecuencia de mantenimiento se pudo realizar para el 100% de los equipos de la planta (Tabla 40).

Tabla 40. Costos totales de mantenimiento por equipo

Código	Equipo	Costo Mto. preventivo	Costo Mto. correctivo
W-01	Balanza	\$ 695.451	\$ 559.677
P-01	Bomba de desplazamiento positivo	\$ 195.040	\$ 367.144
E-02	Baño de enfriamiento	\$ 562.072	\$ 367.088
R-01	Reactor	\$ 561.147	\$ 741.143
PCV-01	Válvula de control de presión	\$ 690.103	\$ 554.335
PCV-11	Válvula de control de presión (Regulador)	\$ 195.058	\$ 367.162
PSV-41	Válvula de Seguridad	\$ 93.531	\$ 273.531
K-14	Tanque de almacenamiento para Alc.	Sin costo de incorporación	
K-01 A	Tanque de precalentamiento	Sin costo de incorporación	
K-02 A	Tanque de precalentamiento	Sin costo de incorporación	
K-01	Tanque de carga	Sin costo de incorporación	
D-04	Separador	\$ 156.824	\$ 330.510
K-05	Tanque de fondos	Sin costo de incorporación	
D-07	Tambor condensador	\$ 894.345	\$ 1.074.345
D-08	Rectificador de nafta	\$ 894.345	\$ 1.074.345
K-09	Tanque de nafta	Sin costo de incorporación	
D-11	Tambor de alivio	Sin costo de incorporación	
E-01	Intercambiador	\$ 894.345	\$ 1.074.345
M-01	Motor agitador	\$ 690.225	\$ 554.457
M-03	Motor	\$ 194.999	\$ 367.103
EV-04	Electroválvula	\$ 93.534	\$ 273.535
PDIT-02	Diferencial de presión	\$ 194.968	\$ 367.075
EV-12	Electroválvula	\$ 93.534	\$ 273.535
LIT-02	Transmisor de nivel	\$ 561.178	\$ 741.174
EV-01	Electroválvula	\$ 93.534	\$ 273.535
H-01	Horno	Sin costo de incorporación	

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

A partir de esta información, para el MP basado en la planificación es necesario definir el instante de tiempo en que deberían realizarse dichos mantenimientos. El *Modelo de minimización de costes basado en el reemplazo preventivo por tiempo (edad constante)*, permite definir el instante de tiempo para el MP, además de incluir en el modelado los tres aspectos: *costes* (costo de mantenimiento preventivo y correctivo, obtenidos mediante la Ecuación 50 y Ecuación 51), *tiempo* (*duración de las actividades del mantenimiento* T_r , Ecuación 50 y Ecuación 51) y *fallas* (función de densidad $f(t)$, la función de distribución $F(t)$ y la fiabilidad $R(t)$ del equipo), como se especifica en la Ecuación 49.

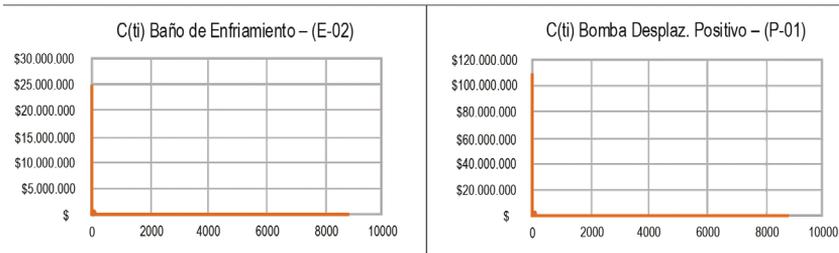
Adicionalmente, para las tres variables asociadas con la falla que afectan la curva de coste de mantenimiento de reemplazo preventivo por el tiempo $C(tp)$: $f(t)$, $F(t)$ y $R(t)$ deben usarse expresiones matemáticas asociadas a la distribución del fallo del equipo; por ejemplo, distribución Gamma, distribución Weibull, distribución Exponencial, etc.

Para el cálculo de la fiabilidad $R(t)$ y la función de densidad $f(t)$ para las tasas de falla gamma tomados de OREDA, se utilizó la aproximación propuesta por Rausand [40]. Se presenta como ejemplo los resultados para la Bomba desplazamiento positivo y Baño de enfriamiento (ver Figura 44). Esto quiere decir que no existe un tp en el cual se minimicen los costos; en este caso la ocurrencia al fallo y su fiabilidad, permitirá identificar el tiempo en el que se espera el fallo, por tal razón es necesario que el establecimiento de la frecuencia del mantenimiento se base en la fiabilidad de los equipos y las tasas de ocurrencia identificadas.

Para identificar el punto exacto donde debe realizar el mantenimiento se hace un análisis de fiabilidad por cada equipo y se determina en qué instante de tiempo la fiabilidad se encuentra por debajo de 85%, que es el límite aceptable de fiabilidad por equipo en el Centro I+D, esta meta es especificada por el Líder de la Planta Piloto de Procesos Térmicos.



Figura 44. Representación gráfica del C (ti) para el Baño de enfriamiento y la Bomba desplazamiento positivo



Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Después de obtener los resultados se realiza una comparación entre la frecuencia programada en el Plan de Mantenimiento del Centro de Innovación y Tecnología, los Standard Job y la frecuencia optimizada resultado de dicho análisis (ver Tabla 41).

Tabla 41. Comparación entre frecuencias de mantenimiento establecida vs optimizada

Familia de equipos	Cantidad	Programa en PM	SJ	Frecuencia propuesta de Mtto preventivo	Fiabilidad en el punto de Mtto
Unidad	94	Semestral	No especificado en SJ	**	**
Balanza	4	No	No SJ	3 meses	84.99937%
Baño de enfriamiento	1	No	Semestral	Inspección visual anual	92.77800%
Bomba de desplazamiento positivo	1	Anual	Semestral	9 meses	84.99857%
Diferencial de presión	1	No	No SJ	Inspección visual anual	95.12100%
Electroválvula	15	No	No SJ	Inspección visual anual	86.92200%
Horno Calent. Enchquetado	1	No	No SJ	Inspección visual anual	91.02200%
Intercambiador / Condensador	2	No	No SJ	2 meses	84.99208%
Motor	1	No	No SJ	Inspección visual anual	89.35500%
Motor agitador	2	Semestral*	No	5 meses	84.99758%

Continúa...

Continuación

Familia de equipos	Cantidad	Programa en PM	SJ	Frecuencia propuesta de Mto preventivo	Fiabilidad en el punto de Mto
Reactor	1	No	No especificado en SJ	Inspección visual anual	99.97100%
Relé	19	Semestral*	No especificado en SJ	A fallo	**
Separador	1	No	No SJ	2 meses	84.99563%
Tanque carga/producto	9	No	No SJ	Inspección visual anual	98.327%
Termocupla	19	No	No especificado en SJ	A fallo	**
Transmisor de nivel	1	No	No SJ	Inspección visual anual	94.32700%
Válvula de control	1	No	No SJ	Semestral	84.99798%
Válvula de control de presión (regulador)	5	No	No SJ	Semestral	84.99798%
Válvula de seguridad	10	Anual	Anual	Inspección visual anual	94.97100%

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

Es importante aclarar que en los mantenimientos preventivos no es obligación realizar la compra del equipo siempre que este mantenimiento se realice, es decir, la compra de equipo se realizara si y solo si es estrictamente necesario, en el momento de realizar dichos mantenimientos y evaluar la situación y estado del mismo.

5.3.2 Escenarios propuestos para el mantenimiento preventivo

Teniendo en cuenta los resultados del *Maintenance effectiveness survey* (MES), se identificó que en promedio el nivel de ocurrencia para los equipos es de nivel 7, esto quiere decir que los equipos han presentado "1 Fallo cada seis meses", esto es 2 fallos al año. Teniendo en cuenta que el mantenimiento preventivo tiene como objetivo anticiparse al fallo, se presentan como escenarios de hasta tres intervenciones de mantenimiento preventivo durante el año, para adelantarse a los dos fallos anuales los cuales se presentan cada



6 meses y minimizar así los costos por correctivo. Se establecieron los cálculos del modelo para el escenario de un mantenimiento preventivo teniendo en cuenta que en la fase IV, para esta actividad se calculan adicionalmente los costos de mantenimiento en el escenario de 2 mantenimientos preventivos y en el escenario de 3 mantenimientos preventivos (ver Tabla 42).

Tabla 42. Consolidación de costo de mantenimiento correctivo, preventivo y total optimizado para la planta

Código	Equipo	Escenarios: Número de Mtto. preventivos	Costo Mtto. preventivo	Costo Mtto. correctivo	Costo Mtto. total
W-01	Balanza	1	\$ 695.451	\$ 559.677	\$ 1.255.127
		2	\$ 1.390.901	\$ 559.677	\$ 1.950.578
		3	\$ 2.086.352	\$ 559.677	\$ 2.646.028
P-01	Bomba de desplazamiento positivo	1	\$ 195.040	\$ 367.144	\$ 562.183
		2	\$ 390.079	\$ 367.144	\$ 757.223
		3	\$ 585.119	\$ 367.144	\$ 952.262
E-02	Baño de enfriamiento	1	\$ 562.072	\$ 367.088	\$ 929.161
		2	\$ 757.057	\$ 367.088	\$ 1.124.145
		3	\$ 952.041	\$ 367.088	\$ 1.319.129
R-01	Reactor	1	\$ 561.147	\$ 741.143	\$ 1.302.290
		2	\$ 1.122.294	\$ 741.143	\$ 1.863.437
		3	\$ 1.683.442	\$ 741.143	\$ 2.424.585
PCV-01	Válvula de control de presión	1	\$ 690.103	\$ 554.335	\$ 1.244.439
		2	\$ 1.380.207	\$ 554.335	\$ 1.934.542
		3	\$ 2.070.310	\$ 554.335	\$ 2.624.645
PCV-11	Válvula de control de presión (Regulador)	1	\$ 195.058	\$ 367.162	\$ 562.220
		2	\$ 390.116	\$ 367.162	\$ 757.278
		3	\$ 585.174	\$ 367.162	\$ 952.336
PCV-12	Válvula de control de presión (Regulador)	1	\$ 195.058	\$ 367.162	\$ 562.220
		2	\$ 390.116	\$ 367.162	\$ 757.278
		3	\$ 585.174	\$ 367.162	\$ 952.336
PSV-41	Válvula de Seguridad	1	\$ 93.531	\$ 273.531	\$ 367.061
		2	\$ 187.061	\$ 273.531	\$ 460.592
		3	\$ 280.592	\$ 273.531	\$ 554.122

Continúa...

162 Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D)

Continuación

Código	Equipo	Escenarios: Número de Mtto. preventivos	Costo Mtto. preventivo	Costo Mtto. correctivo	Costo Mtto. total
K-14	Tanque de almacenamiento para Alc.	Sin costo de incorporación			
K-01 A	Tanque de precalentamiento	Sin costo de incorporación			
K-02 A	Tanque de precalentamiento	Sin costo de incorporación			
K-01	Tanque de carga	Sin costo de incorporación			
D-04	Separador	1	\$ 156.824	\$ 330.510	\$ 487.334
		2	\$ 93.531	\$ 330.510	\$ 644.158
		3	\$ 93.531	\$ 330.510	\$ 800.982
K-05	Tanque de fondos	Sin costo de incorporación			
D-07	Tambor condensador	1	\$ 894.345	\$ 1.074.345	\$ 1.968.690
		2	\$ 1.788.690	\$ 1.074.345	\$ 2.863.035
		3	\$ 2.683.035	\$ 1.074.345	\$ 3.757.380
D-08	Rectificador de nafta	1	\$ 894.345	\$ 1.074.345	\$ 1.968.690
		2	\$ 1.788.690	\$ 1.074.345	\$ 2.863.035
		3	\$ 2.683.035	\$ 1.074.345	\$ 3.757.380
K-09	Tanque de nafta	Sin costo de incorporación			
D-11	Tambor de alivio	Sin costo de incorporación			
E-01	Intercambiador	1	\$ 894.345	\$ 1.074.345	\$ 1.968.690
		2	\$ 1.788.690	\$ 1.074.345	\$ 2.863.035
		3	\$ 2.683.035	\$ 1.074.345	\$ 3.757.380
M-01	Motor agitador	1	\$ 690.225	\$ 554.457	\$ 1.244.682
		2	\$ 1.380.450	\$ 554.457	\$ 1.934.907
		3	\$ 2.070.675	\$ 554.457	\$ 2.625.132
M-03	Motor	1	\$ 194.999	\$ 367.103	\$ 562.103
		2	\$ 389.999	\$ 367.103	\$ 757.102
		3	\$ 584.998	\$ 367.103	\$ 952.102
EV-04	Electroválvula	1	\$ 93.534	\$ 273.535	\$ 367.069
		2	\$ 187.069	\$ 273.535	\$ 460.603
		3	\$ 280.603	\$ 273.535	\$ 554.138
PDIT-02	Diferencial de presión	1	\$ 194.968	\$ 367.075	\$ 562.043
		2	\$ 389.936	\$ 367.075	\$ 757.011
		3	\$ 584.904	\$ 367.075	\$ 951.979

Continúa...



Continuación

Código	Equipo	Escenarios: Número de Mtto. preventivos	Costo Mtto. preventivo	Costo Mtto. correctivo	Costo Mtto. total
EV-12	Electroválvula	1	\$ 93.534	\$ 273.535	\$ 367.069
		2	\$ 187.069	\$ 273.535	\$ 460.603
		3	\$ 280.603	\$ 273.535	\$ 554.138
LIT-02	Transmisor de nivel	1	\$ 561.178	\$ 741.174	\$ 1.302.351
		2	\$ 1.122.355	\$ 741.174	\$ 1.863.529
		3	\$ 1.683.533	\$ 741.174	\$ 2.424.707
EV-01	Electroválvula	1	\$ 93.534	\$ 273.535	\$ 367.069
		2	\$ 187.069	\$ 273.535	\$ 460.603
		3	\$ 280.603	\$ 273.535	\$ 554.138
H-01	Horno	Sin costo de incorporación			

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

5.3.3 Línea base

Se aplica el análisis de ciclo de vida CCV de los activos teniendo en cuenta el modelo presentado en el capítulo 3 [118]. Los resultados obtenidos para la planta piloto de procesos térmicos se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43. CCV para la Planta de Procesos Térmicos

Dimensión	Sub-dimensión	Costo [COP]	Costo final [usd]
Incorporación	Costo de adquisición del activo	\$666.766.694	
	Costo de operador logístico para la importación del activo	\$33.338.335	
	Costo de gestión para la incorporación del activo	\$401.781	
	Costo de pruebas	\$45.535.140	
	Costo del proceso de compras	\$20.822.007	
Suma de las sub dimensiones de la fase de incorporación		\$766.863.956	

Continúa...

Continuación

Dimensión	Sub-dimensión	Costo [COP]	Costo final [usd]
Total costo de incorporación valor presente neto			USD 462.651
Operación	Costo de mano de obra operativo directo	\$117.090.360	
	Costo de mano de obra supervisores directos	\$0	
	Costo de depreciación	\$18.020.721	
	Costo seguro de operación	\$488.236.086	
	Costo de insumos	\$998.458	
	Costo de servicios públicos	\$2.817.753	
	Costo de contrato para operar	\$18.887.932	
Suma de las sub dimensiones de la fase de operación		\$646.051.311	
Total costo de operación valor presente neto			USD 3.180.215
Mantenimiento	Costo de contratos de mantenimiento	\$2.899.157	
Suma de las sub dimensiones de la fase de mantenimiento		\$2.899.157	
			USD 14.271
Desincorporación	Contrato de operación logística inversa	\$1.637.536	
	Costo de análisis técnicos	\$0	
Suma de las sub dimensiones de la fase de desincorporación		\$1.637.536	
Total costo de desincorporación valor presente neto			USD 8.081
Costos indirectos transferidos	Costos indirectos de mantenimiento de equipo	\$86.664.087	
	Costo laboral de gerencia	\$29.127.418	
	Costo laboral de jefes de departamento	\$60.080.780	
	CEMIN	\$6.403.019	
Suma de las sub dimensiones de la fase de transferidos		\$182.275.304	
Total costo transferidos valor presente neto			USD 897.258
Costo total del ciclo de vida para planta piloto viscorreducción y procesos térmicos			USD 4.562.476

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

El valor total del CCV para la Planta de Procesos Térmicos es de USD 4.562.476.



5.3.4 Comparación mantenimiento línea base

Para la comparación del costo de mantenimiento con la línea base, se tiene en cuenta el valor del costo de mantenimiento dependiendo del escenario implicado, y restando el costo del equipo, debido a que en la línea base estos costos están incluidos en el rubro de incorporación de equipo y no en el rubro de mantenimiento.

Tabla 44. Resultados de costos

Planta	Escenarios: número de sucesos	Costo Mtto. Total	Costo Mtto. Total Línea base
Planta Piloto de Procesos Térmicos	1	\$32.353.715	\$2.899.157
	2	\$45.260.920	
	3	\$58.168.125	

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39].

Es necesario aclarar que el costo de mantenimiento optimizado es más alto que la línea base, ya que se obtiene a partir de los modelos de inventario y recurso humano que involucran el 90,4% de equipos en promedio por planta y laboratorio, para los que se requiere el costo de incorporación y el tiempo de reparación, como unas de las entradas principales. Respecto a la línea base se desconoce la cantidad de equipos analizados y se asume que solo incluye los equipos con mantenimiento a falla, para el año en el que se hizo la recolección de la información. Los equipos a los que se pudo calcular el costo de mantenimiento son los especificados en porcentaje en la Tabla 45, debido a la disponibilidad de la información.

Los costos de mantenimiento calculados en la fase IV y V sobrepasan en la línea base puesto que se obtienen unos costos menores de mantenimiento, sin embargo, se recomienda revisar los cálculos de la línea base y detallar los costos involucrados.

Tabla 45. Estadísticas de análisis

Planta	Número de equipos estudiados	Número de equipos totales	Porcentaje de equipos estudiados
Planta Piloto de Procesos Térmicos	85	94	90.4%

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

5.3.5 Magnitud del recurso humano y material, en los diferentes escenarios dados por los parámetros de fiabilidad, tareas y frecuencias del mantenimiento a realizar

Teniendo en cuenta los resultados del *Maintenance effectiveness survey* (MES), y como se mencionó anteriormente la ocurrencia de fallos en promedio es de nivel 7, "1 Fallo cada seis meses", esto es 2 fallos al año, se proponen 3 escenarios diferentes según la cantidad de mantenimientos preventivos propuestos para evitar los 2 fallos anuales, se presentan los resultados de cantidad de recurso humano y material.

Para la frecuencia de mantenimiento preventivo se define un único escenario óptimo debido al análisis de fiabilidad. Las tareas a realizar en los equipos se definen según lo establecido en los Standard Jobs de estos, puesto que son requerimientos fijos según su funcionalidad (Tabla 46).

Tabla 46. Recursos según escenarios de fiabilidad

Equipo	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Frecuencia Mto preventivo propuesta	Fiabilidad en el punto del Mto
	CRH	CRM	CRH	CRM	CRH	CRM		
Balanza	1	1	2	2	3	3	3 meses	85%
Baño de enfriamiento	1	IV	2	IV	3	IV	Inspección visual anual	92.78%

Continúa...



Continuación

Equipo	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Frecuencia Mtto preventivo propuesta	Fiabilidad en el punto del Mtto
	CRH	CRM	CRH	CRM	CRH	CRM		
Bomba desplazamiento positivo	1	1	2	2	3	3	9 meses	85%
Diferencial de presión	1	IV	2	IV	3	IV	Inspección visual anual	95.12%
Electroválvula	1	1	2	2	3	3	Inspección visual anual	86.92%
Horno calent. Enchaquetado	1	IV	2	IV	3	IV	Inspección visual anual	91.02%
Intercambiador / Condensador	1	2	3	4	5	6	2 meses	84.99%
Motor	1	IV	2	IV	3	IV	Inspección visual anual	89.36%
Motor agitador	1	1	2	2	3	3	5 meses	85%
Reactor	1	1	2	2	3	3	Inspección visual anual	99.97%
Relé	Cambio de piezas	2	Cambio de piezas	4	Cambio de piezas	6	A fallo	--
Separador	1	2	3	4	5	6	2 meses	85%
Tanque carga/ producto	1	1	2	2	3	3	9 meses	85%
Termocupla	Cambio de piezas	2	Cambio de piezas	4	Cambio de piezas	6	A fallo	--
Transmisor de nivel	1	IV	2	IV	3	IV	Inspección visual anual	94.33%
Válvula de control	1	1	2	2	3	3	Semestral	85%
Válvula control de presión (regulador)	1	1	2	2	3	3	Semestral	85%
Válvula de seguridad	1	IV	2	IV	3	IV	Inspección visual anual	94.97%

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39]

En la Tabla 46, el escenario 1 significa un mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo, este se calcula solo para tener un remanente económico en el caso que dicha situación se presente; el escenario 2, dos mantenimientos preventivos y un probable mantenimiento correctivo, y el escenario 3 significa tres mantenimientos preventivos y un probable mantenimiento correctivo.

Para cada uno de estos escenarios se define la cantidad de recurso humano (CRH) que realizará los mantenimientos preventivos, la cantidad de recurso material (CRM), es decir, la cantidad de repuestos o equipos necesarios para el mantenimiento, y la frecuencia con la que se realizarán los mantenimientos preventivos según el escenario óptimo.

Los recursos y frecuencias de mantenimiento establecidas en cada escenario corresponden a los resultados de la implementación del modelo de inventarios y sus respectivas recomendaciones según fiabilidad de los equipos y al modelo de recurso humano $G/G/m$.

Los equipos establecidos con la sigla IV, significa inspección visual, es decir, no es necesario comprar un repuesto/equipo, si no que por el contrario realizar una inspección y revisión visual para identificar si el equipo requiere algún tipo de mantenimiento. Finalmente, se consolida los resultados de la optimización de mantenimiento para la planta en la Tabla 47.



Tabla 47. Resultado consolidado de optimización de mantenimiento

Código	Equipo	Cantidad recurso humano	Cantidad recurso material	Tiempo de la tarea de Mtto	Fuente Tiempo tarea Mtto
Equipos reparables					
W-01	Balanza	1	1	18 h	3 meses
P-01	Bomba desplazamiento positivo	1	1	9 h	9 meses
E-02	Baño de enfriamiento	IV	1	9 h	Inspección visual anual
R-01	Reactor	IV	1	27 h	Inspección visual anual
PCV-01	Válvula de control de presión	1	1	18 h	Semestral
PCV-11	Válvula de control de presión (regulador)	1	1	9 h	Semestral
PSV-41	Válvula de seguridad	IV	1	9 h	Inspección visual anual
K-14	Tanque de almacenamiento para Alc.	1	1	27 h	9 meses
K-01A	Tanque de precalentamiento	1	1	27 h	9 meses
K-01	Tanque de carga	1	1	27 h	9 meses
D-04	Separador	1	1	7.2 h	2 meses
K-05	Tanque de fondos	1	1	27 h	9 meses
D-07	Tambor condensador	1	1	43 h	2 meses
D-08	Rectificador de nafta	1	1	27 h	2 meses
K-09	Tanque de nafta	1	1	27 h	9 meses
D-11	Tambor de alivio	1	1	27 h	9 meses
E-01	Intercambiador	1	1	43 h	2 meses
M-01	Motor agitador	1	1	18 h	5 meses
M-03	Motor	IV	1	9 h	Inspección visual anual
EV-04	Electroválvula	IV	1	4.5 h	Inspección visual anual
PDIT-02	Diferencial de presión	IV	1	9 h	Inspección visual anual
LIT-02	Transmisor de nivel	IV	1	9 h	Inspección visual anual
H-01	Horno	IV	1	2 h	Inspección visual anual
Equipos no reparables					
TT-12	Termocupla	--	2	Cambio de pieza	--
TY-12	Relé	--	2	Cambio de pieza	--

Fuente: Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para plantas piloto. [39].

Los equipos que tienen definida dicha inspección, es producto de contar con una fiabilidad mayor al 85% en un año.

Conclusiones

Las acciones de mantenimiento preventivo realizadas a intervalos de tiempo fijos son muy frecuentes en el mantenimiento de equipos, ya que permite disminuir su probabilidad de fallas, la pérdida causada por la falla del sistema o la degradación del rendimiento. El *Modelo de minimización de costes basado en el reemplazo preventivo por tiempo (edad constante)*, permite cuantificar el periodo de tiempo de ejecución de mantenimiento preventivo en el cual se genera menor coste (coste mínimo por unidad de tiempo) debido a que este se ve influenciado por la función de densidad $f(t)$, función de distribución $F(t)$, fiabilidad $R(t)$, costo de mantenimiento preventivo C_p y correctivo C_f de los equipos. En el caso de que al aplicar el modelo no exista un tp en el cual se minimicen los costos; la ocurrencia al fallo y su fiabilidad, permitirá identificar el tiempo en el que se espera el fallo.

Se aplicó el *Modelo de minimización de costes basado en el reemplazo preventivo por tiempo (edad constante)* a los 18 equipos de la planta de procesos térmicos presentándose como ejemplo la gráfica del costo total para los equipos: Bomba desplazamiento positivo y Baño de enfriamiento, los cuales muestran que no existe un tp que minimice los costos, por tal razón el establecimiento de la frecuencia del mantenimiento preventivo se basa en la fiabilidad de los equipos y las tasas de ocurrencia identificadas.

Teniendo en cuenta los resultados del *Maintenance effectiveness survey* (MES) del año instrumental, se identificó que en promedio el nivel de ocurrencia para los equipos es de nivel 7, esto quiere decir que los equipos han presentado "1 Fallo cada seis meses", esto es 2 fallos al año. Teniendo en cuenta que el mantenimiento preventivo tiene como objetivo anticiparse al fallo, se presentan como escenarios de hasta tres intervenciones de mantenimiento preventivo durante el año, para adelantarse a los dos fallos anuales los cuales se presentan cada 6 meses, y minimizar así los costos por correctivo.



Respecto a la meta de fiabilidad (límite aceptable) de un equipo en el Centro I+D, especificada por el Líder de la Planta Piloto de Procesos Térmicos es de hasta un 85%. Se establecieron los cálculos del modelo para el escenario de un mantenimiento, en el escenario de 2 mantenimientos preventivos y en el escenario de 3 mantenimientos preventivos. Se aplica el análisis de ciclo de vida CCV base de los activos obteniéndose un costo de contratos de mantenimiento por \$2.899.157, el cual es aproximadamente un 9% del coste de mantenimiento obtenido con el modelo incluyendo la optimización de costos de los recursos humanos y materiales y utilizando el primer escenario que es un mantenimiento preventivo y un correctivo; con un costo de contratos de mantenimiento por \$32.353.715.

Es necesario aclarar que el costo de mantenimiento optimizado es más alto que la línea base ya que se obtiene a partir de los modelos de inventario y recurso humano que involucran el 90.4% de equipos en promedio por planta y laboratorio, para los que se requiere el costo de incorporación y el tiempo de reparación, como unas de las entradas principales.

Respecto a la línea base se desconoce la cantidad de equipos analizados y se asume que solo incluye los equipos con mantenimiento a falla, para el año en el que se hizo la recolección de la información, el valor fue suministrado por el personal del Centro I+D.



Referencias

- [1] Ahmad, R., Kamaruddin, S., Azid, I., & Almanar, I. (2011). Maintenance management decision model for preventive maintenance strategy on production equipment. *Journal of Industrial Engineering International*, 7 (13), 22-34.
- [2] V. & M. J. Deshpande, *Application of RCM to a médium scale industry, Reliability engineering and system safety, nº77 pp 31-43.*, 2002.
- [3] F. J. González F, Reducción de costes y mejora de resultados en mantenimiento. La gestión mediante indicadores., Madrid: Fundación Confemetal, D.L., 2010.
- [4] L. Hu-Chen, *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods*, Springer Science+Business Media Singapore, 2016.
- [5] S. O. Duffuaa y A. Raouf, *Planning and Control of Maintenance Systems: Modelling and Analysis. Second Edition*, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [6] L. Fedele, *Methodologies and Techniques for Advanced Maintenance*, Springer Science & Business Media, 2011.
- [7] M. Ben-Daya, S. O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic y D. Ait-Kadi, *Handbook of Maintenance Management and Engineering*, London: Springer, 2009.
- [8] A. M. Smith y G. R. Hinchcliffe, *Preventive Maintenance Definition and Structure*. In: *RCM. Gateway to World Class Maintenance.*, 1st Edition. Elsevier Inc. Butterworth-Heinemann. Oxford., 2004.
- [9] M. Villamizar, *Optimización de requisitos operacionales y mantenimiento en centrales nucleares considerando el efecto de las incertidumbres. (Tesis Doctoral)*. Universidad Politécnica de Valencia, 2011.

- [10] S. Martorell, A. Muñoz y V. G. Serradell, *Resultados del estudio piloto sobre mantenimiento centrado en fiabilidad para la Central Nuclear Cofrentes. 21 Reunión anual de la sociedad Nuclear Española.*, Tarragona, 1995.
- [11] A. J. Fernández, *Programa de optimización del mantenimiento de Central Nuclear Cofrentes. 21 Reunión anual de la Sociedad Nuclear Española.*, Tarragona, 1995.
- [12] M. Mujica y I. Flores, *Applied Simulation and Optimization 2: New Applications in Logistics, Industrial and Aeronautical Practice.*, Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [13] R. Cottle y M. Thapa, *Linear and Nonlinear Optimization*, New York, NY: Springer, 2017.
- [14] K.-L. Du y M. N. S. Swamy, *Search and Optimization by Metaheuristics. Techniques and Algorithms Inspired by Nature.*, Birkhäuser, Cham, 2016.
- [15] D. J. Smith, *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. Ninth Edition.*, Butterworth-Heinemann, 2017.
- [16] F. Corvaro, G. Giacchetta, B. Marchetti y M. Recanati, «Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618.,» *Petroleum*, pp. 266-272, 2017.
- [17] S. Qin, L. Hu, K. Chen, R. Barnsley, A. Sirinelli, Y. Song, K. Lu, D. Yao, Y. Chen, S. Li, H. Cao, H. Yu, X. Sheng y R. team, «RAMI analysis for ITER radial X-ray camera system.,» *Fusion Engineering and Design*, pp. 169-176, 2016.
- [18] D. Wang, R. Yuan, J. Wang, F. Wang y J. Wang, «Preliminary RAMI analysis of DFLL TBS for ITER.,» *Fusion Engineering and Design.*, pp. 192-197, 2016.
- [19] E. Calixto, *Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis*, Gulf Professional Publishing, 2016.



- [20] I.-H. Choi y D. Chang, «Reliability and availability assessment of seabed storage tanks using fault tree analysis,» *Ocean Engineering*, pp. 1-14, 2016.
- [21] R. Tiusanen, J. Jännes, M. Reunanen y J. Liyanage, *RAMS management - from single analyses to systematic approach*, Stavanger: Maneesh Singh, Raj B.K.N. Rao, J.P. Liyanage, 2011.
- [22] D. van Houtte, K. Okayama y F. Sagot, «RAMI Approach for ITER,» *Fusion Engineering and Design*, pp. 1220-1224, 2010.
- [23] K. Okayama, D. v. Houtte, F. Sagot y S. Maruyama, «RAMI analysis for ITER fuel cycle system,» *Fusion Engineering and Design*, pp. 598-601, 2011.
- [24] A. T. Almeida, C. Virgínio, M. Alencar, R. Pires, A. Almeida-Filho y T. Garcez, *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*, Springer, 2015.
- [25] S. Xiao-Sheng, Z. Zheng-Xin y H. Chang-Hua, *Data-Driven Remaining Useful Life Prognosis Techniques. Stochastic Models, Methods and Applications*, Springer, 2017.
- [26] S. Axsäter, Planning order releases for an assembly system with random operation times. In: Liberopoulos G., Papadopoulos C.T., Tan B., Smith J.M., Gershwin S.B. (eds) *Stochastic Modeling of Manufacturing Systems.*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [27] C. C. Sherbrooke, *Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques*, Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [28] L. Fortuna, S. Graziani, A. Rizzo y M. Xibilia, *Soft Sensors for Monitoring and Control of Industrial Processes*, London: Springer, 2007.
- [29] S. Fararooy, J. Allan, S. K. Abed y N. Lehrasad-Khan, «Condition monitoring of railway equipment: experiences from case studies,» *In The 9th International Congress on Condition Monitoring & Diag-*

- nostic Engineering Management: COMADEM*, pp. Vol. 96, pp. 56-60, 1996.
- [30] M. d. C. T. e. Innovación, «minciencias.gov.co,» [En línea]. Available: https://minciencias.gov.co/portafolio/reconocimiento_de_actores/centros-institutos-investigacion. [Último acceso: Enero 2022].
- [31] Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga; Ecopeptrol , Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D) en un centro de innovación y tecnología del sector oil&gas: Nivel Instrumental, Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana, 2019.
- [32] BS-EN-ISO-14224, *Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural - recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos*, The British Standards Institution 2016, 2016.
- [33] Reliabilityweb, «Análisis ISO 14224/OREDA - Reliabilityweb. Recuperado 24 de febrero de 2018.,» s. f.. [En línea]. Available: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/analisis-iso-14224-oreda>.
- [34] UNE-EN-13306, *Mantenimiento. Terminología del mantenimiento. Asociación Española de Normalización y Certificación. Marzo 2011*, 2011.
- [35] UNE-EN-61703, *Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento. (Ratificada por la Asociación Española de Normalización en febrero de 2017.)*, 2016.
- [36] C. J. Zapata, *Confiabilidad en Ingeniería - Universidad Tecnológica de Pereira*, Publiprint Ltda, 2011.
- [37] E. Calvo y C. Sierra, *Técnicas de mantenimiento en instalaciones mineras. Open Course Ware. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, Universidad de Cantabria, Santander*, 2017.



- [38] H. J. Picón y J. A. Castro, «Instructivo operacional para la planta de procesos térmicos U-4700 - Gestión de Tecnología de Negocio - Instituto Colombiano del Petróleo ICP,» Piedecuesta, Santander, 2017.
- [39] L. M. Ardila, "Modelado y simulación del servicio de mantenimiento para las Plantas Piloto U740, U4700 y el Laboratorio de Daños a la Formación en el Centro de Innovación y Tecnología – ICP," Proyecto de Grado, Escuela de Ingenierías, UPB, Bucaramanga, Santander, 2018.
- [40] M. Rausand y A. Hoyland, System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications, Wiley-Interscience, 2003.
- [41] UNE-EN-61649, *Análisis de Weibull*, 2012.
- [42] OREDA, Offshore and Onshore Reliability Data Handbook 6th ed., 2015.
- [43] A. Creus Solé, FIABILIDAD Y SEGURIDAD. Su aplicación en procesos industriales, Marcombo, 2005.
- [44] H. P. Bloch y F. K. Geitner, Practical Machinery Management for Process Plants, Volume 2: Machinery Failure Analysis and Troubleshooting., Elsevier, 1997.
- [45] T. P. Ryan, Statistical Methods for Quality Improvement, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [46] K. P. Tran, «Designing of Run Rules t control charts for monitoring changes in the process mean,» *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, pp. 85-93, 2018.
- [47] K. E. McKone, R. G. Schroeder y K. O. Cua, «The impact of total productive maintenance practices on manufacturing performance,» *Journal of Operations Management*, pp. 39-58, 2001.

- [48] W. Zhou y G. Zhu, «Economic design of integrated model of control chart and maintenance management,» *Mathematical and Computer Modelling*, pp. 1389-1395, 2008.
- [49] S. Kumar y B. Kumar Lad, «Integrated production and maintenance planning for parallel machine system considering cost of rejection,» *Journal of the Operational Research Society*, pp. 834-846, 2017.
- [50] M. Ben Daya y M. A. Rahim, «Effect of maintenance on the economic design of \bar{x} -control chart,» *European Journal of Operational Research*, pp. 131-143, 2000.
- [51] C. R. Cassady, R. O. Bowden, L. Liew y E. A. Pohl, «Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation,» *IIE Transactions*, pp. 471-478, 2000.
- [52] A. E. Quintana, P. M. Virginia y R. N. Casal, «Desempeño de cartas de control estadístico con límites bilaterales de probabilidad para monitorear procesos Weibull en mantenimiento.,» *Ingeniería, investigación y tecnología*, pp. 143-156, 2015.
- [53] M. Xie, T. N. Goh y P. Ranjan, «Some effective control chart procedures for reliability monitoring,» *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 143-150, 2002.
- [54] D. C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons, Sixth Edition, 2009.
- [55] E. Chaparro y J. Vargas, «Gráficos de control para la media de un proceso en poblaciones con distribución asimétrica,» *Revista Colombiana de Estadística*, pp. Vol. 23 - 29-44, 2000.
- [56] A. J. Duncan, *Quality control and industrial statistics (only)*. Chicago: Irwin (espec. pp. 626-27), 160., 1952.
- [57] UNE-EN-61078, *Técnicas de análisis de la confiabilidad. Método del diagrama de bloques de la fiabilidad y métodos booleanos*, 2006.



- [58] ReliaSoft-Corporation, *System Analysis Reference. Chapter 3. RBDs and Analytical System Reliability*, Tucson, Arizona, 2015.
- [59] J. M. Storch de Gracia, *Manual de seguridad industrial en plantas químicas y petroleras: fundamentos, evaluación de riesgos y diseño*, Madrid, España: McGraw-Hill Vol. 2, 1998.
- [60] Q. Hu, J. E. Boylan, H. Chen y A. Ashraf W. Labib, «OR in spare parts management: A review,» *European Journal of Operational Research*, pp. 395-414, 2018.
- [61] H. C. Co y A. Araar, «Age-maintenance of an M/G/l production system,» *International Journal of Production Research*, pp. 2135-2149, 2007.
- [62] J. Koyanagi y H. Kawai, «An optimal age maintenance for an M/G/1 queueing system,» *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 38, pp. 1333-1338, 2003.
- [63] D. Aïssani, K. Abbas y I. Issaadi, «A weak perturbation theory for approximations of invariant measures in M/G/1 model,» *Rairo Operations Research*, vol. 52, pp. 1411-1428, 2018.
- [64] L. F. Hsu y C. S. Tapiero, «Quality control of the M/G/1 queue,» *European Journal of Operational Research*, vol. 42, pp. 88-100, 1989.
- [65] J. J. Hasenbein, Y. Cai, E. Kutanoglu y M. Liao, «Single-Machine Multiple-Recipe Predictive Maintenance,» *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, vol. 27, pp. 209-235, 2013.
- [66] W. Wang y A. H. Christer, «A delay-time-based maintenance model of a multi-component system,» *IMA Journal of Management Mathematics*, vol. 6, pp. 205-222, 1995.
- [67] J. Koyanagi y H. Kawai, «An Optimal Maintenance Policy for a Queueing System Server Under Periodic Observation,» *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, vol. 4, pp. 357-367, 1997.

- [68] H. K. Aksoy y S. M. Gupta, «Near optimal buffer allocation in remanufacturing systems with N-policy,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 59, pp. 496-508, 2010.
- [69] T. Dohi, H. Okamura y S. Osaki, «Optimal policies for a controlled queueing system with removable server under a random vacation circumstance,» *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 39, pp. 215-227, 2000.
- [70] H. Ohshimo y S. Osaki, «Reliability/performance evaluation for a multisystem with preventive maintenance,» *Microelectronics Reliability*, vol. 25, pp. 841-846, 1985.
- [71] B. Render, R. Stair y M. Hanna, *Métodos cuantitativos para los negocios*, Pearson Educación, 2006.
- [72] W. J. Kennedy, J. Wayne Patterson y L. D. Fredendall, «An overview of recent literature on spare parts inventories,» *International Journal of Production Economics*, pp. 201-215, 2002.
- [73] J. Huiskonen, «Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices,» *International Journal of Production Economics*, pp. 125-133, 2001.
- [74] A. Brezavscek y A. Hudoklin, «Joint optimization of block-replacement and periodic-review spare-provisioning policy,» *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 52, pp. 112-117, 2003.
- [75] K. S. de Smidt-Destombes, M. C. van der Heijden y A. van Harten, «Availability of -out-of- systems under block replacement sharing limited spares and repair capacity,» *International Journal of Production Economics*, pp. 404-421, 2007.
- [76] F. Zahedi-Hosseini, P. Scarf y A. A. Syntetos, «Joint optimisation of inspection maintenance and spare parts provisioning: a comparative study of inventory policies using simulation and survey data,» *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 168, pp. 306-316, 2017.



- [77] A. Alrabghi y A. Tiwari, «A Review of Simulation-Based Optimisation in Maintenance Operations,» *UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, pp. 353-358, 2013.
- [78] A. van Horenbeek, J. Buré, D. G. Cattrysse, L. M. Pintelon y P. Vans-teenwegen, «Joint maintenance and inventory optimization systems: A review,» *International Journal of Production Economics*, pp. 499-508, 2013.
- [79] A. Tiwari y A. Alrabghi, «State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 82, pp. 167-182, 2015.
- [80] S. Panagiotidou, «Joint optimization of spare parts ordering and maintenance policies for multiple identical items subject to silent failures,» *European Journal of Operational Research*, vol. 235, pp. 300-314, 2014.
- [81] R. A. Sarker y M. A. Haque, «Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation,» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 24, pp. 751-760, 2000.
- [82] A. Chelbi y D. Ait-Kadi, «Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure,» *International Journal of Production Economics*, vol. 74, pp. 183-189, 2001.
- [83] Y. K. Yoo, K. J. Kim y J.-h. Seo, «Optimal joint spare stocking and block replacement policy (cost modelling of spare stocking and block replacement),» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 18, pp. 906-909, 2001.
- [84] T. S. Vaughan, «Failure replacement and preventive maintenance spare parts ordering policy,» *European Journal of Operational Research*, vol. 161, pp. 183-190, 2005.
- [85] M. A. Ilgin y S. Tunali, «Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms,» *International*

Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 34, pp. 594-604, 2007.

- [86] R. Huang, L. Meng, L. Xi y C. R. Liu, «Modeling and analyzing a joint optimization policy of block-replacement and spare inventory with random-leadtime,» *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 57, pp. 113-124, 2008.
- [87] K. S. de Smidt-Destombes, M. C. van der Heijden y A. van Harten, «Joint optimisation of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for k-out-of-N systems,» *International Journal of Production Economics*, vol. 118, pp. 260-268, 2009.
- [88] W. Wang, «A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the Delay-Time concept,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 96, pp. 1535-1541, 2011.
- [89] W. Wang, «A stochastic model for joint spare parts inventory and planned maintenance optimisation,» *European Journal of Operational Research*, vol. 216, pp. 127-139, 2012.
- [90] L. Chen, J. Wu, Z. Zheng, M. R. Lyu y Z. Wu, «Modeling and exploiting tag relevance for web service mining,» *Knowledge and Information Systems*, pp. 153-173, 2014.
- [91] S. Gan, Z. Zhang, Y. Zhou y J. Shi, «Joint optimization of maintenance, buffer, and spare parts for a production system,» *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, pp. 6032-6042, 2015.
- [92] Y. Jiang, M. Chen y D. Zhou, «Joint optimization of preventive maintenance and inventory policies for multi-unit systems subject to deteriorating spare part inventory,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 35, pp. 191-205, 2015.
- [93] N. K. Samal y D. K. Pratihar, «Joint optimization of preventive maintenance and spare parts inventory using genetic algorithms and particle swarm optimization algorithm,» *International Journal of*



- Systems Assurance Engineering and Management*, vol. 6, pp. 248-258, 2015.
- [94] A. Alrabghi y A. Tiwari, «A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 154, pp. 160-170, 2016.
- [95] T. Kuschel y S. Bock, «The weighted uncapacitated planned maintenance problem: Complexity and polyhedral properties,» *European Journal of Operational Research*, vol. 250, nº 3, pp. 773-781, 2016.
- [96] J. Wikstén y M. Johansson, *Maintenance and reliability with focus on aircraft maintenance and spares provisioning, Bachelor's thesis, Lulea University of Technology, Luleå, 2006.*
- [97] J. Palma, F. C. Gómez de León, M. Campos y L. Guillén-Cárceles, «Scheduling of maintenance work: A constraint-based approach,» *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 2963-2973, 2010.
- [98] D. Murthy, A. Atrens y J. Eccleston, «"Strategic maintenance management",» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 8, nº 4, pp. 287-305, 2002.
- [99] E. Basri, I. Razak, H. Ab-Samat y S. Kamaruddin, «Planificación del mantenimiento preventivo (PM): una revisión,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 23, nº 2, pp. 114-143, 2017.
- [100] J. Reason, *Cognitive Engineering in Aviation Domain Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ., 2000.*
- [101] L. Swanson, «Linking maintenance strategies to performance,» *International Journal of Production Economics*, vol. 70, nº 3, pp. 237-244, 2001.
- [102] D. F. Percy y K. A. Kobbacy, «Determining economical maintenance intervals,» *International Journal of Production Economics*, vol. 67, nº 1, pp. 87-94, 2000.

- [103] J. P. Liyanage y U. Kumar, «Towards a value-based view on operations and maintenance performance management,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 9, nº 4, pp. 333-350, 2003.
- [104] S. O. Duffuaa, A. Raouf y J. Campbell, *Planning and Control of Maintenance Systems: Modelling and Analysis*, New York: John Wiley and Son, 1999.
- [105] A. Turkcan, M. S. Akturk y R. H. Storer, «Due date and cost-based FMS loading, scheduling and tool management,» *International Journal of Production Research*, vol. 45, nº 5, pp. 1183-1213, 2007.
- [106] K. Kobbacy, B. Fawzi, D. Percy y H. Ascher, «A full history proportional hazards model for preventive maintenance scheduling,» *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 13, nº 4, pp. 187-198, 1997.
- [107] M. Darghouth, D. Ait-Kadi y A. Chelbi, «Joint reliability based design and periodic preventive maintenance policy for systems sold with warranty,» *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 22, nº 1, pp. 2-17, 2016.
- [108] V. Mijailovic, «Probabilistic method for planning of maintenance activities of substation components,» *Electric Power Systems Research*, vol. 64, nº 1, pp. 53-58, 2003.
- [109] M. Bartholomew-Biggs, B. Christianson y M. Zuo, «Optimizing Preventive Maintenance Models,» *Computational Optimization and Applications*, vol. 35, pp. 261-279, 2006.
- [110] R. Briš, É. Châtelet y F. Yalaoui, «New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems,» *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 82, nº 3, pp. 247-255, 2003.
- [111] T.-W. Lin y C.-H. Wang, «A hybrid genetic algorithm to minimize the periodic preventive maintenance cost in a series-parallel system,» *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 23, pp. 1225-1236, 2012.



- [112] Ö. Tosun y O. Kuruüzüm, «Preventive Maintenance Optimization Under Deterioration,» *Ataturk University Journal of Economics & Administrative Sciences*, vol. 23, nº 4, pp. 125-134, 2009.
- [113] S. Panagiotidou y G. Tagaras, «Optimal preventive maintenance for equipment with two quality states and general failure time distributions,» *European Journal of Operational Research*, vol. 180, nº 1, pp. 329-353, 2007.
- [114] R. Ahmad, S. Kamaruddin, I. Azid y I. Almanar, «Maintenance management decision model for preventive maintenance strategy on production equipment,» *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 7, nº 13, pp. 22-34, 2011.
- [115] K. Cicek, H. H. Turan, Y. I. Topcu y M. N. Searslan, *Risk-based preventive maintenance planning using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for marine engine systems, Second International Conference on Engineering System Management and Applications*. pp. 1-6., 2010, pp. 1-6.
- [116] F. I. Khan y M. M. Haddara, «Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning,» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 16, nº 6, pp. 561-573, 2003.
- [117] J. D. Campbell, A. K. Jardine y J. McGlynn, *Asset Management Excellence: Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*, CRC Press, 2016.
- [118] E. Gutiérrez, G. Rueda, N. Moreno, M. Rey, M. Villamizar, A. Santos, J. Villamizar, M. Villa, Ó. Pinzón, S. Sotelo, P. Jaimes, D. Gómez, N. Martínez, R. Plata y C. Martínez, *Gestión de la confiabilidad de activos de investigación y desarrollo (I+D) en un centro de innovación y tecnología del sector oil & gas: nivel instrumental*, Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2019.

- [119] M. A. Navas, *Estudio de la fiabilidad de los sistemas reparables y desarrollo de un procedimiento de análisis multivariante. (Tesis Doctoral) Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales*, 2017.
- [120] K. W. Linderman, K. E. McKone-Sweet y J. C. Anderson, «An integrated systems approach to process control and maintenance,» *European Journal of Operational Research*, pp. 324-340, 2005.
- [121] D. M. Hawkins y D. H. Olwell, *Cumulative Sum Charts and Charting for Quality Improvement*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [122] P. Castagliola y M. Khoo, «A Synthetic Scaled Weighted Variance Control Chart for Monitoring the Process Mean of Skewed Populations,» *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, pp. 1659-1674, 2009.
- [123] P. Bülbül, Z. P. Bayindir y İ. S. Bakal, «Exact and heuristic approaches for joint maintenance and spare parts planning,» *Computers & Industrial Engineering*, pp. 239-250, 2019.
- [124] S. Kalpakam y S. Shanthi, «A perishable inventory system with modified (S-1,S) policy and arbitrary processing times,» *Computers & Operations Research*, pp. 453-471, 2001.
- [125] R. Dekker, «Applications of maintenance optimization models: a review and analysis,» *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 229-240, 1996.
- [126] A. Andijani y S. Duffuaa, «Critical evaluation of simulation studies in maintenance systems.,» *Production Planning & Control*, pp. 336-341, 2002.
- [127] A. Atta, M. Khoo y C. C-H, *Proposed Xbar and S Control Charts for Skewed Distributions*, Hong Kong, 2009.
- [128] M. Xie y M. Khoo, «A study of time between events control chart for the monitoring of regularly maintained systems,» *Quality and Reliability Engineering International*, pp. 805-819, 2008.



- [129] G. Tagaras y S. Panagiotidou, «Optimal preventive maintenance for equipment with two quality states and general failure time distributions,» *European Journal of Operational Research*, pp. 329-353, 2007.
- [130] M. C. van der Heijden, K. S. de Smidt-Destombes y A. van Harten, «Joint optimisation of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for k-out-of-N systems,» *International Journal of Production Economics*, pp. 260-268, 2009.
- [131] R. Petrović, A. Šenborn y M. Vujošević, «Spare allocation in the presence of uncertainty,» *European Journal of Operational Research*, pp. 77-81, 1982.
- [132] L. Jafari, F. Naderkhani y V. Makis, «Joint optimization of maintenance policy and inspection interval for a multi-unit series system using proportional hazards model,» *Journal of the Operational Research Society*, 2017.
- [133] O. Roux, M. Jamali, D. Ait Kadi y E. Châtelet, «Development of simulation and optimization platform to analyse maintenance policies performances for manufacturing systems,» *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 407-414, 2008.
- [134] N. Rezg, A. Chelbi y X. Xie, «Modeling and optimizing a joint inventory control and preventive maintenance strategy for a randomly failing production unit: Analytical and simulation approaches,» *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 225-235, 2005.
- [135] M.-C. Chen, C.-M. Hsu y S.-W. Chen, «Optimizing joint maintenance and stock provisioning policy for a multi-echelon spare part logistics network,» *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, pp. 289-302, 2006.
- [136] P. Kuntz, R. Christie y S. Venkata, «A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 718-723, 2001.

- [137] L. Wang, J. Chu y W. Mao, «A condition-based order-replacement policy for a single-unit system,» *Applied Mathematical Modelling*, pp. 2274-2289, 2008.
- [138] T. Murino, E. Romano y P. Zoppoli, «Maintenance policies and buffer sizing: an optimization model,» *WSEAS Transactions on Business and Economics*, pp. 21-30, 2009.
- [139] A. Shenfield, P. Fleming, V. Kadiramanathan y J. Allan, «Optimisation of maintenance scheduling strategies on the grid,» *Annals of Operations Research*, pp. 213-231, 2010.
- [140] D. Duivier, O. Roux, G. Quesnel y É. Ramat, «Optimization of preventive maintenance through a combined maintenance-production simulation model,» *International Journal of Production Economics*, pp. 3-12, 2013.
- [141] Y. Lei, J. Liu y J. Lee, «Production line simulation using STPN for maintenance scheduling,» *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 213-221, 2010.
- [142] A. Ali, X. Chen, Z. Yang, J. Lee y J. Ni, «Optimized maintenance design for manufacturing performance improvement using simulation,» *Winter Simulation Conference*, pp. 1811-1819, 2008.
- [143] A. Arab, N. Ismail y L. S. Lee, «Maintenance scheduling incorporating dynamics of production system and real-time information from workstations,» *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 695-705, 2013.
- [144] A. D. Belegundu y T. R. Chandrupatla, *Optimization Concepts and Applications in Engineering*, Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [145] A. Oyarbide-Zubillaga, A. Goti y A. Sanchez, «Preventive maintenance optimisation of multi-equipment manufacturing systems by combining discrete event simulation and multi-objective evolu-



- tionary algorithms,» *Production Planning & Control*, pp. 342-355, 2008.
- [146] Y. Hani, L. Amodeo, F. Yalaoui y H. Chen, «Simulation based optimization of a train maintenance facility,» *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 293-300, 2008.
- [147] R. L. Cheu, Y. Wang y T. F. Fwa, «Genetic Algorithm-Simulation Methodology for Pavement Maintenance Scheduling,» *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, pp. 446-455, 2004.
- [148] G. Guizzi, M. Gallo y P. Zoppoli, «Condition based maintenance: Simulation and optimization,» *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering*, pp. 17-19, 2009.
- [149] A. Alabdulkarim, P. Ball y A. Tiwari, «Assessing asset monitoring levels for maintenance operations: A simulation approach,» *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 26, 2015.
- [150] H. A. Taha, Investigación de operaciones, Naucalpan de Juárez: Novena Edición. Pearson Educación de México, S.A., 2012.
- [151] I. I. International Organization for Standardization, Petroleum, petrochemical and natural gas industries-Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment, 3 ed., Ginebra, 2016.

 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p>	<p>SU OPINIÓN</p>	
<p>Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto. La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos. Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565 o vía correo electrónico a editorial@upb.edu.co Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre, correo electrónico y número telefónico.</p>		

Esta obra se publicó en archivo digital
en el mes de julio de 2022.

Los resultados de este trabajo colaborativo facilitaron la transferencia de conocimiento y aprendizaje en doble vía, fortaleciendo las competencias en el saber, ser y hacer de los estudiantes y profesionales involucrados, mediante trabajos de grado de nivel de pregrado y posgrado, publicación de artículos científicos, ponencias nacionales e internacionales y desarrollos tecnológicos y de innovación que contribuyen al desarrollo de la industria.

Hoy compartimos esta obra de investigación que ha sido posible gracias a la participación y compromiso de directivos, administradores, profesores, estudiantes de pregrado y posgrado de la Universidad Pontificia Bolivariana, así como de los funcionarios del Instituto Colombiano del Petróleo, Centro de Innovación y Tecnología de Ecopetrol, y que a través de la cual evidenciamos las capacidades físicas y tecnológicas con las que cuentan las dos instituciones.

La experiencia en el desarrollo de proyectos conjuntos entre las dos instituciones, una educativa y la otra del segmento de la energía, nos permite hacer aportes significativos al conocimiento científico y tecnológico, dando respuestas a las necesidades de nuestro entorno y convirtiéndose en una gran apuesta a emular para el desarrollo y competitividad de la región y del país.

ISBN: 978-628-500-047-8



ISBN: 978-628-500-048-5
<https://repository.upb.edu.co/>