

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y DE CONFIABILIDAD PARA LA PREDICCIÓN DE
FALLAS Y COSTOS PARA UNA FACILIDAD DE LA INDUSTRIA DEL
PETRÓLEO.

LARISSA AVELLA RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE POSGRADOS
BUCARAMANGA
2017

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y DE CONFIABILIDAD PARA LA PREDICCIÓN DE
FALLAS Y COSTOS PARA UNA FACILIDAD DE LA INDUSTRIA DEL
PETRÓLEO.

LARISSA AVELLA RODRIGUEZ

Trabajo de grado para optar el título de
Magister en Gerencia de Mantenimiento

Director
PhD. DAVID ALFREDO FUENTES DÍAZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE POSGRADOS
BUCARAMANGA
2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios por el Don de la vida, por su amor y bondad que no tienen fin.

A mis queridos padres porque sin su valioso apoyo y consejos este nuevo logro no habría sido posible.

A mi hermana por sus recomendaciones, regaños, pero sobre todo por estar a mi lado cuando más la necesito.

A mi hermano por su ayuda y aliento.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	19
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo general.	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO.....	20
1.4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	21
2. DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES	24
2.1 DEFINICIONES.....	24
2.1.1 Mantenimiento.	24
2.1.2 Mantenimiento preventivo.	24
2.1.3 Mantenimiento correctivo.	24
2.1.4 Falla.	25
2.1.5 Datos de la falla. Estos datos se caracterizan por:.....	25
2.1.6 Causa de fallo. Razón que conduce a la realización de una falla.	25
2.1.8 MTTF/TPO (<i>Mean Time to Failure</i>).	26
2.1.9 MDT/TPFS (<i>Mean Down Time</i>).	26
2.1.10 MTTR/TPPR (<i>Mean Time to Repair</i>).....	26
2.2 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	27
2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE MANTENIMIENTO	27
2.3.1 Diagrama de Pareto.	28
2.4 ANÁLISIS CMD (CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD) 28	
2.4.1 Confiabilidad.	30
2.4.2 Disponibilidad.....	31
2.4.3 Mantenibilidad.	32
2.4.4 Curva de la confiabilidad o curva de la bañera.....	33

_Toc482904141

2.5 PRONÓSTICOS.....	35
2.5.1 Series de Tiempo.	37
2.6 PRONÓSTICO POR SERIES TEMPORALES	39
2.6.1 Evaluación de los métodos de pronóstico por serie de tiempo.	41
2.6.2 Métodos de pronóstico por serie de tiempo.....	42
2.7 CICLO DMAIC.....	48
2.7.1 Pasos metodología DMAIC.	49
2.8 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN	56
2.8.1 Descripción del proceso.	56
2.8.2 Descripción general de los sistemas..	57
3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	61
3.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS DATOS DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA	62
3.2 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS IDENTIFICADOS	66
3.3 ANÁLISIS de DATOS DE FALLA PARA LOS EQUIPOS MAL ACTOR	69
3.3.1 Turbo-generadores.	69
3.3.2 Compresor de gas de reinyección.	69
3.4 COSTO DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO.....	72
3.4.1 Costo mantenimiento correctivo Turbo-generadores.	73
3.4.2 Costo mantenimiento correctivo turbinas reinyección.	74
3.5 CONCLUSIONES CAPÍTULO.....	76
4. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD (CMD)	
77	
4.1 DATOS A ANALIZAR	77
4.2 CÁLCULO PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD y DISPONIBILIDAD (CMD)	78
4.2.1 Estimación de los parámetros de la Confiabilidad.	78
4.2.2 Estimación de los parámetros de la mantenibilidad.	80
4.2.3 Estimación de los parámetros de la disponibilidad.	81
4.3 ANÁLISIS CMD SISTEMAS MAL ACTOR DE LA PLANTA	82
4.3.1 Sistema de generación.....	83
4.3.2 Sistema de Reinyección.....	90

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	96
5. PRONÓSTICO POR SERIES DE TIEMPO	97
5.1 SELECCIÓN DE DATOS	97
5.2 PRONÓSTICO POR SERIE DE TIEMPOS EQUIPO T5 SISTEMA DE REINYECCIÓN	98
5.2.1 Pronóstico TBF equipo T5 sistema de Reinyección	98
5.2.2 Pronóstico TTR equipo T5 sistema de Reinyección.	102
5.3 PRONÓSTICO POR SERIE DE TIEMPOS EQUIPO G1 SISTEMA DE GENERACIÓN	106
5.3.1 Pronóstico TBF equipo G1 sistema de Generación.	106
5.3.2 Pronóstico TTR equipo G1 sistema de Generación.	110
5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	112
6. ACCIONES DE MEJORA.....	114
6.1 IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS U OPORTUNIDADES DE MEJORA... 114	
6.2 ACCIONES DE MEJORA PROPUESTAS PARA LOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS.....	116
6.2.1 Plan de acción disminución de fallas disciplina de instrumentación y control.	116
6.2.2 Plan de acción baja confiabilidad de los equipos.:	119
6.2.3 Plan de acción baja mantenibilidad.	121
6.2.4 Plan de acción disminución de costos disciplina mecánica.....	122
6.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	124
7. CONCLUSIONES.....	125
8. RECOMENDACIONES	127
9. BIBLIOGRAFÍA	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica de tiempos de un equipo.	29
Figura 2. Curva de la bañera.....	34
Figura 3. Métodos de pronósticos	36
Figura 4. Patrones de las series de tiempo	39
Figura 5. Las cinco etapas de la metodología DMAIC	48
Figura 6. Componentes para definir la oportunidad o problema.....	49
Figura 7. Matriz de clasificación de soluciones.	53
Figura 8. Formato DMAIC propuestas de mejora.....	55
Figura 9. Esquema general planta de producción.	56
Figura 10. Gráficos % mantenimientos año 1 - Año 5.	62
Figura 11. Mantenimiento correctivo.	64
Figura 12. Distribución mantenimiento correctivo por disciplinas	64
Figura 13. % Órdenes de trabajo de mantenimiento correctivo por sistemas.	65
Figura 14. % Órdenes de trabajo de mantenimiento correctivo por equipos	66
Figura 15. Ordenes de trabajo correctivo sistema de reinyección.....	66
Figura 16. Ordenes de trabajo correctivo sistema de generación.	67
Figura 17. Componentes en falla Sistema Reinyección para la disciplina de instrumentación.....	67
Figura 18. Componentes en falla Sistema Generación para la disciplina de instrumentación.....	68
Figura 19. Horas totales Vs cantidad de eventos por equipo.	70
Figura 20. Intervalos de tiempo Vs eventos de parada.	70
Figura 21. Horas totales Vs Cantidad de eventos acumulados por año.....	71
Figura 22. Horas totales Vs Cantidad de eventos acumulados año Y2.....	71
Figura 23. Horas totales Vs Cantidad de eventos acumulados Y5.....	72
Figura 24. Costo anual mantenimiento.....	73
Figura 25. Costo mantenimiento correctivo sistema generación.	73
Figura 26. Costo mantenimiento correctivo sistema de generación.	74
Figura 27. Costo mantenimiento correctivo sistema reinyección.....	74
Figura 28. Costo mantenimiento correctivo sistema de reinyección por disciplinas.	75
Figura 29. Costo mantenimiento correctivo Reinyección por modo de falla.....	75
Figura 30. Confiabilidad Vs tiempo para el sistema de generación.....	83
Figura 31. Función de densidad de probabilidad de fallas sistema de generación.	84
Figura 32. Función de tasa de falla del sistema de generación.....	85
Figura 33. Mantenibilidad Vs Tiempo sistema de generación.	87

Figura 34. Función de densidad de probabilidad de mantenibilidad sistema de generación.....	87
Figura 35. Confiabilidad Vs Tiempo Reinyección.....	90
Figura 36. Función de densidad de probabilidad de fallas de reinyección.	91
Figura 37. Mantenibilidad Vs Tiempo del sistema de reinyección.	93
Figura 38. Función de densidad de probabilidad de mantenibilidad de Reinyección.	93
Figura 39. Gráfico de datos TBF T5 sistema de reinyección.....	99
Figura 40. Análisis de regresión de los datos TBF T5.....	100
Figura 41. Gráfico de datos TBF T5 con pronóstico.....	102
Figura 42. Gráfico de datos TTR T5.....	103
Figura 43. Análisis de regresión datos TTR equipo T5	103
Figura 44. Nuevo gráfico de datos TTR equipo T5 sin dato atípico.....	104
Figura 44. Análisis de Regresión datos TTR equipo T5 sin dato atípico	104
Figura 46. Gráfico de datos TTR con pronóstico.....	106
Figura 47. Gráfico de datos TBF G1.	107
Figura 48. Análisis de regresión de los datos TBF equipo G1.....	107
Figura 49. Gráfico de datos TBF equipo G1 con pronóstico.	109
Figura 50. Gráfico de datos TTR G1.	110
Figura 51. Análisis de regresión de los datos TTR del equipo G1.....	111
Figura 52. Gráfico de datos TTR equipo G1 con pronóstico.	112

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Métodos por series de tiempo para pronósticos	40
Tabla 2. Benchmark de las mejores prácticas de mantenimiento.	63
Tabla 3. Comparación componentes sistema de Reinyección y sistema de generación.....	68
Tabla 4. Parámetro de forma Beta de <i>Weibull</i>	79
Tabla 5. Beta para inspecciones programadas	80
Tabla 6. Resultados análisis de confiabilidad sistema de generación.....	83
Tabla 7. Resultados parámetros de Confiabilidad del sistema de Generación.	85
Tabla 8. Resultados análisis de mantenibilidad de generación	86
Tabla 9. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de generación....	88
Tabla 10. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de generación..	88
Tabla 11. Calculo de disponibilidad.....	89
Tabla 12. Resultados análisis de confiabilidad reinyección.....	90
Tabla 13. Resultados parámetros de confiabilidad del sistema de reinyección	92
Tabla 14. Resultados análisis de mantenibilidad del sistema de reinyección.....	92
Tabla 15. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de Reinyección.	94
Tabla 16. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de reinyección.	95
Tabla 17. Calculo de disponibilidad sistema de reinyección.	95
Tabla 18. Datos TBF Equipo T5 sistema de reinyección.....	99
Tabla 19. Errores Calculados para los datos TBF del equipo T5.	101
Tabla 20. Resultado pronóstico TBF equipo T5 del sistema de reinyección por el método RL.....	101
Tabla 21. Datos TTR Equipo T5.....	102
Tabla 22. Errores calculados para los datos TTR del equipo T5.....	105
Tabla 23. Resultado pronóstico por el método RL.	105
Tabla 24. Datos TBF Equipo G1.	106
Tabla 25. Errores calculados para los datos TBF del equipo G1.	108
Tabla 26. Resultado menor error.....	108
Tabla 27. Resultado pronóstico por el método SED.....	109
Tabla 28. Datos TTR Equipo G1.	110
Tabla 29. Errores calculados para los datos TTR del equipo G1.	111
Tabla 30. Resultado pronóstico por el método RL.	112
Tabla 31. Plan de disminución de fallas disciplina de instrumentación y control.	117
Tabla 32. Acciones cuarto paso del ciclo DMAIC plan disminución de fallas de instrumentación & control.	118
Tabla 33. Plan de acción baja confiabilidad de los equipos.	120
Tabla 34. Plan de acción para Baja mantenibilidad.....	121

Tabla 35. Acciones cuarto paso ciclo DMAIC plan baja mantenibilidad.	122
Tabla 36. Plan de disminución de costos disciplina mecánica.	122
Tabla 37. Acciones de mejora propuestas para el plan de disminución de costos de la disciplina mecánica	123
Tabla 39 . Cálculo de pronostico parámetro TBF G1	135
Tabla 40. Cálculo del error	136
Tabla 41. Cálculo del pronóstico parámetro TTR G1	137
Tabla 42. Cálculo del error	138
Tabla 43. Cálculo del pronóstico parámetro TBF T5	140
Tabla 44. Cálculo del error	142
Tabla 45. Cálculo del pronóstico parámetro TTR T5.....	145

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Datos parámetros	131
ANEXO B. Cálculos pronósticos	135

ACRÓNIMOS

CMD: Confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad

TBF: Tiempo entre fallas

TTR: Tiempo para reparar

MTBF: Tiempo medio entre fallas

MTTR: Tiempo medio para reparar

DMAIC: Definir, medir, analizar, mejorar y controlar

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y DE CONFIABILIDAD PARA LA PREDICCIÓN DE FALLAS Y COSTOS PARA UNA FACILIDAD DE LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO*

AUTOR: LARISSA JORLEANY AVELLA RODRÍGUEZ**

PALABRAS CLAVES: Análisis estadístico, análisis CMD, confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, distribución *Weibull*, pronósticos, acciones de mejora, falla, dato, series de tiempo, DMAIC

DESCRIPCIÓN: Este trabajo busca de una forma sencilla realizar un análisis de los datos de falla de los equipos, usando métodos estadísticos y de confiabilidad que permitan a la organización la toma de decisiones para realizar una adecuada gestión del mantenimiento de sus equipos.

Para lograr lo anterior, se inicia con un glosario de términos y definiciones relativos a la gestión del mantenimiento.

Luego, se realiza un análisis de los datos registrados en la base de datos del Sistema de Gestión Computarizado del mantenimiento (CMMS) de las actividades de mantenimiento realizadas, especialmente para los trabajos realizados que fueron clasificados como mantenimientos correctivos, con el uso de histogramas y diagramas de Pareto, lo cual permitió la identificación de malos actores según la cantidad de trabajos realizados para un sistema.

Se continúa con el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CMD), donde se desarrolla un estudio de las fallas que provocaron la salida de los equipos, de los sistemas identificados como mal actor en el capítulo anterior, para esto se realiza un análisis de la curva de la bañera y de los índices de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para los equipos pertenecientes a los sistemas identificados. Lo siguiente fue realizar pronóstico del TBF para los equipos seleccionados en el capítulo anterior, por medio del método de series de tiempo y como último paso, la formulación de las propuestas de acciones de mejora de acuerdo a los análisis realizados usando la metodología DMAIC.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingeniería Física – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. David Alfredo Fuentes Díaz.

ABSTRACT

TÍTULO: STATISTICAL AND RELIABILITY ANALYSIS FOR THE PREDICTION OF FAILURES AND COSTS FOR AN FACILITY OF THE PETROLEUM INDUSTRY.*

AUTHOR: LARISSA JORLEANY AVELLA RODRÍGUEZ**

KEY WORDS: Statistical analysis, CMD analysis, reliability, maintainability, availability, Weibull distribution, forecasts, improvement actions, failure, data, time series, DMAIC.

DESCRIPTION: This work seeks to easily perform an analysis of equipment failure data, using statistical and reliability methods that allow the organization to make decisions to perform an adequate maintenance management of equipment's. To achieve this, it began with a glossary of terms and definitions related to maintenance management.

Then, an analysis of the data recorded of the database of the Computerized Maintenance Management System (CMMS) of the maintenance activities performed, especially for the works that have been classified as corrective maintenance, with the use of histograms and Pareto diagrams, which allowed the identification of bad actors according to the amount of work done for a system.

The analysis of reliability, availability and maintainability (CMD), where is develops a study of the failures that cause the equipment damage, of the systems identified as a bad actor in the previous chapter. For this an analysis of the curve of the bath is realized and the reliability, availability and maintainability indexes for the equipment belonging to the identified systems.

The following was to perform TBF forecast for the equipment selected in the previous chapter by means of the method of the time series and as a last step was the preparation of proposals for improvement actions according to the analyzes performed using the DMAIC methodology.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Física – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. David Alfredo Fuentes Díaz.

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo el mantenimiento y su concepto han estado relacionados a la época y entorno en los que se desarrolla; obteniendo una posición estratégica como clave en la búsqueda del costo-beneficio, donde se busca cambiar el enfoque del mantenimiento como un costo o gasto y se vea como una unidad generadora de ingresos en concordancia con la estrategia de gestión de las empresas.

El mantenimiento busca incrementar la confiabilidad de los activos y de los procesos, utilizando diferentes prácticas que van más allá de la reparación de máquinas como inicialmente nació, hoy en día su objetivo principal es la gestión de la planeación de las actividades, identificación de oportunidades de mejora, organizar y controlar la ejecución de las actividades de mantenimiento, de tal forma que se tengan adecuados sistemas de información que permitan la toma de decisiones.

Este proyecto describe de una forma estructurada, las bases y conceptos fundamentales para comprender cómo por medio de un análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) y pronósticos se puede contribuir en el desarrollo de estrategias de prevención de fallas y disminución de costos para las organizaciones.

El contenido de este trabajo está dividido en 5 partes, el Capítulo 1, Generalidades del Proyecto, este se compone de los conceptos básicos tratados en el desarrollo del trabajo relacionados con la gestión del mantenimiento, análisis estadístico de fallas, análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), pronósticos y propuestas de mejora.

El capítulo 2, Análisis estadístico, presenta el análisis de los datos de mantenimiento de la planta, estos datos fueron tomados del CMMS, clasificados para buscar identificar los malos actores.

El capítulo 3, Análisis CMD, tiene como propósito general presentar los cálculos de los índices de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad de los sistemas de la planta que fueron elegidos como mal actor, con la información de la base de datos de mantenimiento y de averías de los equipos. El cálculo e interpretación de estos índices permitirá visualizar el comportamiento de un activo, considerando los aspectos de, frecuencia de falla, tiempo de reparación y tiempo de operación.

El capítulo 4, Pronósticos, se evalúa el comportamiento futuro probable de los sistemas o equipos seleccionados para pronosticar, con el método de series de tiempo.

El Capítulo 5, Propuestas de mejora, propone las acciones de mejora de acuerdo a los análisis y pronósticos realizados, usando la metodología DMAIC.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La búsqueda por mejorar la rentabilidad dentro de las empresas ha llevado a buscar en sus diferentes áreas oportunidades de optimización de sus recursos, puesto que el mantenimiento está relacionado con la rentabilidad a través de la productividad de los equipos y el gasto de explotación (Kelly & Harris, 1997), esto se logra por medio de acciones orientadas a direccionar y organizar los recursos, controlar la disponibilidad y el funcionamiento de una planta a un nivel especificado para contribuir en mejorar la rentabilidad. Un campo cuenta con equipos que llevan operando de manera continua muchos años, los cuales, en la fase de inicio de operación tenían en un 100%, sus indicadores de desempeño. Pero con el transcurrir de los años y el desgaste natural de sus componentes se generan paradas por fallas que afectan el desempeño, disponibilidad y confiabilidad de los equipos, aumentando sus costos de operación y mantenimiento. Estos mantenimientos de emergencia, provocan la desviación de recursos y el aumento de costos; se detiene el proceso productivo, más los costos asociados con la intervención (repuestos, mano de obra, etc.), no permite seguir la programación de mantenimiento, produciendo pérdidas de tiempo, represamiento de los trabajos y, ya que en este, hay que actuar de la manera más rápida posible para restablecer el funcionamiento del equipo. Las empresas tienen datos históricos de los mantenimientos realizados y de sus averías, sin embargo no cuentan con herramientas que les permitan utilizar métodos estadísticos para analizar los datos de falla y así la probabilidad de ocurrencia de fallos en el tiempo y de otros índices como la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad y así pronosticar las fallas en las máquinas y equipos y a partir de éstos, diseñar estrategias que permitan disminuir la tasa de falla de los equipos, las paradas no planeadas, afectando en la menor medida posible la producción y por ende no afectando la rentabilidad.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Realizar análisis estadístico y de confiabilidad para la predicción de fallas y costos para una Instalación de la industria del petróleo.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Analizar los datos históricos de mantenimiento de la Planta.
- Realizar análisis CMD (Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad) para la Planta.
- Realizar pronóstico de fallas que proporcione información para el proceso de toma de decisiones para la Planta.
- Proponer acciones de mejora que permitan minimizar el impacto de los posibles problemas identificados.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO

Este trabajo busca, a partir del comportamiento histórico de mantenimiento y falla de los equipos, realizar un análisis, aplicando técnicas estadísticas y diferentes metodologías como el análisis CMD (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad) y los pronósticos para predecir el comportamiento de los equipos y así, con un cierto grado de certeza, conocer qué va a pasar en el futuro, permitiendo disminuir la incertidumbre acerca de la ocurrencia de las fallas, establecer metas de desempeño y junto a las propuestas de mejora sería una guía para orientar a la organización en la toma de decisiones, produciendo mejora de la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, lo que significa menos paradas imprevistas, menos sobre-tiempo, mayor optimización de los recursos físicos y administrativos, lo que daría como resultado una mayor satisfacción del cliente, traduciéndose en ventajas competitivas para la empresa, logrando mejorar sus índices de rentabilidad.

1.4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El libro de (Mora Gutierrez, 2009) fundamenta un enfoque sistémico kantiano que permite entender, manejar y controlar un sistema de mantenimiento y producción. Muestra la aplicación de conceptos relevantes sobre la medición real de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. (Newbrough, 1982) Explica temas de la administración del mantenimiento, en diferentes niveles de esa función, desde supervisores hasta los ejecutivos máximos. En sus páginas se hace especial énfasis en los principios, procedimientos y técnicas. (Kelly & Harris, 1997) presenta una revisión de la función del mantenimiento en términos de causas, características y costes del trabajo del mantenimiento, enfatizando la importancia de la fiabilidad y la mantenibilidad, también aborda la toma de decisiones, del análisis de fallos y su aplicación en la diagnosis de las causas del fallo.

En el texto (Navarro Elola, Pastor Tejedor, & Mugaburu Lacabarrera, 1997) explica qué es el mantenimiento, no solo prestando atención a los aspectos técnicos de mantenimiento, sino también a su gestión y organización, teniendo en cuenta factores económicos, de seguridad y medio ambientales. (Amendola, 2002) aplica prácticas de la ingeniería de confiabilidad y mantenibilidad en la industria, describe los nuevos modelos de gestión de mantenimiento y un conjunto de técnicas que se emplean en el entorno industrial.

El énfasis de (Nachlas, 1995) son los conceptos de análisis efectivo de fiabilidad donde fundamenta conceptos a métodos eficaces. El handbook de (Pham, 2002) proporciona conceptos de fiabilidad, optimización entre otros, ayudando así a la interpretación de los diferentes datos.

El libro de (Dhillon, 1999) presenta los conceptos de mantenibilidad tradicional hasta la moderna los cuales cumplen los retos de los sistemas modernos. En el libro de (Mike West, 1997) describe la estructura y teoría de las clases de Modelos dinámicos y sus usos en la predicción y análisis de series de tiempo.

En el texto de (Du, 2008) se observa el desarrollo de un marco para el entendimiento de las fallas de los equipos en una planta de arenas petrolíferas, aplicando diversas técnicas estadísticas a los datos identificando la mejor estrategia de mantenimiento. (Mahendra Gor, 2009) plantea técnicas de predicción y presenta de forma general los pasos en el proceso de predicción. En la investigación de (Naseri, 2016) se identifican y discuten los elementos clave de las condiciones de operar en el Ártico y sus efectos sobre el rendimiento de la CMD de las instalaciones de producción de O & G, desarrolla modelos basados en el análisis del desempeño CMD que operan en el ambiente Ártico.

En la investigación de (Popova et al., 2006) se presenta un modelo de factor estadístico para pronosticar el costo de mantenimiento para el mes siguiente teniendo en cuenta el número esperado de intervenciones de mantenimiento no planeadas (debido al fallo). (Salazar Moreno, Rojas Aguilar, Figueroa Hernandez, & Pérez Soto, 2013) plantea aplicaciones de la distribución Weibull en ingeniería de confiabilidad. Los artículos de (Murillo, 2010a, 2010b) explican una técnica del uso de distribuciones Weibull y log Normal desarrolladas para el análisis y predicción de falla, donde se realiza un análisis de las fallas, buscando y eliminando los malos actores, donde también presenta un caso de estudio de malos actores.

Los autores (Toro Osorio & Céspedes Gutiérrez, 2001) explican una metodología para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del mantenimiento, realizando una fundamentación teórica y estudiando las principales medidas de CMD.

Así mismo (Para, Crespo, & Fygueroa, 2004) desarrolla un modelo integral de mejoramiento de la confiabilidad en instalaciones petroleras de subsuelo, que involucra la aplicación y adecuación de varias técnicas de optimización de confiabilidad. Las notas de (García Palencia & González, 2003) proponen un modelo de mantenimiento óptimo basado en estadística, como una herramienta en la toma de decisiones gerenciales también presenta la metodología estadística para determinar el comportamiento de los equipos y su frecuencia óptima de intervención, necesaria para lograr el costo total mínimo de mantenimiento.

(Cartagena Jadeth, 2012) desarrolla un modelo para establecer la condición actual de los sistemas de bombeo de una planta, respecto a su disponibilidad y confiabilidad. La descripción presentada por (Hernández Ruiz & López Aguilar, Iván Diego, 2013; López Cuello & Ducuara Vásquez, 2012) explica a través del planteamiento, una estrategia de mejora sobre las acciones y/o proyectos, de mejoramiento continuo, emprendidos por las organizaciones, utilizando la metodología Seis Sigma definiendo la siguiente metodología: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, esto es conocido como DMAIC, que son las etapas para la realización de proyectos en la mejora de los procesos existentes.

En el texto de (Ramírez Castaño, 2014) se muestra de una manera muy didáctica, todo el proceso que permite realizar el análisis de datos de fallas de componentes y sistemas, especialmente eléctricos, empleando métodos estadísticos que le permitan al ingeniero, hacer una programación adecuada del mantenimiento de equipos y sistemas eléctricos.

2. DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES

Este capítulo se compone de los conceptos básicos tratados en el desarrollo del trabajo relacionados con la gestión del mantenimiento, análisis estadístico de fallas, análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), pronósticos y propuestas de mejora.

2.1 DEFINICIONES

2.1.1 Mantenimiento. Es la combinación de todas las acciones técnicas y administrativas, incluyendo acciones de supervisión, encaminadas a mantener una parte en funciones o restaurar cierta parte en un estado en el cual pueda ejecutar las funciones requeridas (ISO-14224, 2006).

O también se puede definir como la “combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y gerenciales durante el ciclo de vida de un ítem con el fin de mantenerlo, o restaurarlo, a un estado en el cual pueda desempeñar la función requerida” (UNE-EN 13306:2011, 2011).

2.1.2 Mantenimiento preventivo. Mantenimiento realizado en intervalos predeterminados o de acuerdo a criterios prescritos y con el fin de reducir la probabilidad de falla o la degradación de la funcionalidad del ítem.

2.1.3 Mantenimiento correctivo. Mantenimiento realizado luego del reconocimiento de una falla y con el fin de llevar el ítem a un estado en el cual pueda realizar una función requerida.

2.1.4 Falla. Conclusión de la capacidad de una parte para realizar una función requerida (ISO-14224, 2006).

2.1.5 Datos de la falla. Estos datos se caracterizan por:

- Los datos de identificación, registro de la falla y localización del equipo;
- Los datos de la falla que la definen, por ejemplo: datos de la falla, componentes mantenibles que fallaron, clase de severidad, modo que presenta la falla, causas de la falla, método de observación (ISO-14224, 2006).

2.1.6 Causa de fallo. Razón que conduce a la realización de una falla. ¹

2.1.7 MTBF/TPEF (*Mean Time Between Failures*). El tiempo promedio entre fallas Indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento “fallo”. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo como se muestra en la ecuación (1).

$$MTBF = \frac{TBF}{\# fallas} \quad (1)$$

¹ UNE-EN 13306:2011. Mantenimiento. Terminología del mantenimiento. AENOR. 2011.

2.1.8 MTTF/TPO (*Mean Time to Failure*). Este indicador mide el tiempo promedio que es capaz de operar el equipo a capacidad sin interrupciones dentro del período considerado; este constituye un indicador indirecto de la confiabilidad del equipo o sistema. El Tiempo Promedio para Fallar también es llamado “Tiempo Promedio Operativo” o “Tiempo Promedio hasta la Falla”. Como se observa en la ecuación (2)

$$MTTF = \frac{TTF}{\# \text{ fallas}} \quad (2)$$

2.1.9 MDT/TPFS (*Mean Down Time*). Tiempo promedio fuera de servicio, como se expresa en la ecuación (3).

$$MDT = \frac{DT}{\# \text{ fallas}} \quad (3)$$

2.1.10 MTTR/TPPR (*Mean Time to Repair*). El tiempo promedio para reparar es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que la unidad se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado. El Tiempo Promedio para Reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad, es decir, a la ejecución del mantenimiento, como se presenta en la ecuación (4).

$$MTTR = \frac{TR}{\# \text{ fallas}} \quad (4)$$

UT: Tiempo útil

DT: Tiempo no operativo

2.2 GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

La gestión de mantenimiento consiste en coordinar, dirigir y organizar los recursos materiales, humanos y flujos de información destinados al correcto funcionamiento, reparación y prolongación de la vida de los equipos disponibles (mantenimiento), para que además de lograr el buen funcionamiento en las labores propias de mantenimiento se consiga una contención del gasto y la optimización de costes.

La eficiencia con la que la gestión de mantenimiento contribuye para alcanzar la producción total mediante la dotación de capacidades y fiabilidad del parque industrial, se plasma al maximizar la disponibilidad de los equipos.

La Gestión Integral del Mantenimiento busca garantizarle al cliente interno o externo la disponibilidad de los activos fijos, cuando lo requieran con *Confiabilidad y Seguridad Total*, durante el tiempo óptimo necesario para operar con las condiciones tecnológicas exigidas previamente, para producir bienes o servicios que satisfagan necesidades, deseos o requerimientos de los usuarios, con los niveles de calidad, cantidad y tiempo solicitados, en el momento oportuno, al menor costo posible y con los mayores índices de productividad, rentabilidad y competitividad.

2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE MANTENIMIENTO

La estadística estudia métodos científicos para recoger, organizar, resumir y analizar datos, así como para sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en tal análisis². El análisis estadístico es el análisis de datos cuantitativos o cualitativos con el fin de describir, analizar e interpretar algo sobre la población estudiada. Algunas de las herramientas que permite medir y evaluar la correcta ejecución de la gestión de mantenimiento se consideran de carácter

² SPIEGEL, Murray & STEPHENS, L. J. Estadística. McGraw Hill. 2009.

estadístico; estas se encargan de conceptualizar y presentar de manera sencilla los distintos detalles y resultados obtenidos en el estudio de la gestión de mantenimiento que se aplique en una empresa. Por medio de gráficos y tablas es posible percibir variaciones en la vida útil de un equipo, errores u omisiones en su plan de mantenimiento particular y los límites de desempeño establecidos para un tiempo de operación estipulado teniendo como condición que el equipo se utilice según sea el fin para el cual fue diseñado. ³

2.3.1 Diagrama de Pareto. El principio de Pareto dice que el 20% de una acción producirá el 80% de los efectos, es una técnica gráfica que clasifica los elementos desde los más frecuentes hasta los menos frecuentes, de una forma visual el orden de importancia, permitiendo identificar de forma sencilla diferentes elementos que se encuentran involucrados en un fallo, como puede ser el modo de falla más repetitivo, el equipo con mayor cantidad de mantenimientos correctivos y de esta forma se identifica con mayor facilidad los aspectos que deben ser mejorados primero.⁴

2.4 ANÁLISIS CMD (CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD)

El desarrollo de las técnicas de confiabilidad comienza en la segunda guerra mundial, como una respuesta a los rápidos desarrollos tecnológicos y a las intensas exigencias sobre los equipos donde se busca analizar sistemáticamente la causa de las fallas e incorporar los resultados en diseños mejorados.⁵

³ ZAPATA, Andreina. Análisis estadístico de la gestión del mantenimiento. Universidad Nor-Oriental Privada Gran Mariscal de Ayacucho.2012

⁴ Montgomery, D. C. (2008). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. LIMUSA.

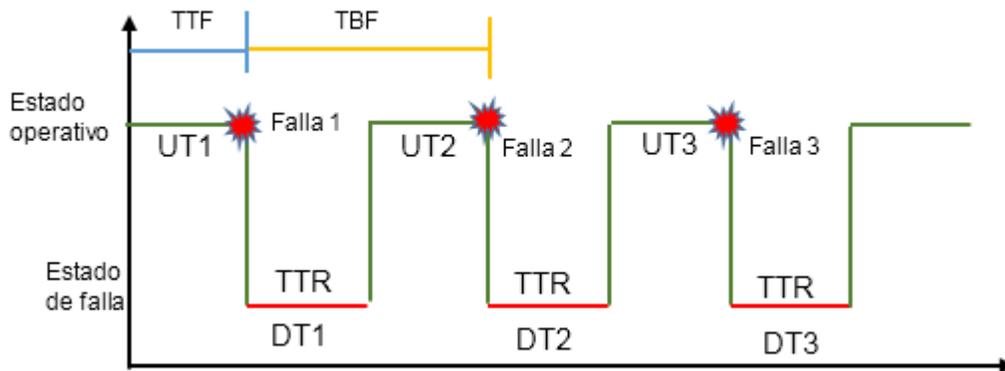
⁵ DU, J. Evaluation of equipment reliability, availability and maintainability in an oil sands processing plant. Tesis Maestría. Universidad de British Columbia. 2008.

Con esta metodología se busca evaluar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de sistemas reparables a través del tratamiento estadístico de su historial de fallas y reparaciones.

La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad, son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos, que tiene el mantenimiento para su análisis⁶ y su evaluación integral y específica; es a través del CMD que se puede planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar totalmente la gestión y operación del mantenimiento.⁷

En la figura 1 se muestran los tiempos importantes y siglas que se usan en la medición CMD, cuyas definiciones se pueden encontrar al comienzo de este capítulo.

Figura 1. Representación gráfica de tiempos de un equipo.



La confiabilidad depende de las fallas, la mantenibilidad de las reparaciones o de la eliminación de fallas o de los mantenimientos que se puedan hacer y la disponibilidad de ambos, de las fallas y reparaciones.

⁶ MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009

⁷ MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009

La metodología CMD, consiste en poder predecir el comportamiento futuro de los equipos, en cuanto a saber sobre: las fallas o reparaciones (tiempos y fechas de ocurrencia), los tiempos útiles (duración y días en que ocurrirán), los mantenimientos planeados (para su programación en tiempos y frecuencias).

Confiabilidad. La confiabilidad puede ser expresada como la probabilidad de que un ítem pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidas. La confiabilidad estudia la longevidad y el fallo de los equipos, usando principios científicos y matemáticos para una mayor comprensión de los fallos de los dispositivos, permitiendo identificar mejoras que se pueden introducir para eliminar o por lo menos minimizar las consecuencias de los fallos.

La confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista bajo unas condiciones específicas durante un tiempo determinado.

Puede ser expresada a través de la expresión dada en la ecuación (5):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Dónde:

$R(t)$ Confiabilidad de un equipo en un tiempo t dado

e Constante neperiana

λ Tasa de fallas (# de fallas por periodo de operación)

t Tiempo

Un indicador de gestión que frecuentemente es usado para evaluar la confiabilidad es el MTBF (tiempo medio entre fallas), el cual se define como se muestra en la ecuación (6):

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n TBF}{\sum \text{fallas}} \quad (6)$$

2.4.1 Disponibilidad. La disponibilidad de un dispositivo es la probabilidad de que un equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación cuando se usa bajo condiciones estables, funcionando en cualquier tiempo⁸ La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un elemento. Se pueden calcular diferentes tipos de confiabilidad, esto depende de los datos que se tengan y los requerimientos de la organización, teniendo en cuenta lo que se quiera medir y controlar⁹.

La disponibilidad se puede medir como se muestra en las ecuaciones (7)-(9):

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + mantenibilidad} \quad (7)$$

$$Disponibilidad = \frac{Tiempo\ en\ que\ el\ dispositivo\ opera\ correctamente\ y\ funciona\ bien}{Tiempo\ en\ el\ que\ el\ equipo\ puede\ operar} \quad (8)$$

$$Disponibilidad = \frac{Media\ de\ los\ tiempos\ útiles}{Media\ de\ los\ tiempos\ útiles + Media\ de\ los\ tiempos\ de\ no\ funcionalidad} \quad (9)$$

Se referencian las siguientes disponibilidades:

- Disponibilidad genérica: se utiliza cuando la información que se dispone, solo contempla los tiempos útiles y los de no funcionalidad, pero no se lleva control de causa, tipo de evento, etc.

⁸ KELLY, A, & HARRIS, M. J. Gestión del mantenimiento industrial.

⁹ MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009

- Disponibilidad inherente o intrínseca: se calcula cuando se desea controlar las actividades de mantenimientos no planeados (mantenimientos correctivos), solo tiene en cuenta fallas o pérdidas de funcionalidad por razones propias del equipo y no exógenas del mismo. Sus parámetros son MTBF y MTTR.

- Disponibilidad alcanzada: se usa cuando se desean controlar las actividades de mantenimiento planeadas (preventiva, predictiva) y las correctivas por separado, no tiene en cuenta los tiempos de espera.

- Disponibilidad operacional: es útil cuando se quiere conocer el comportamiento de los tiempos de espera o demora administrativos o de recursos físicos o humanos, tanto para las actividades de mantenimiento planeadas y no planeadas.

- Disponibilidad operacional generalizada: se usa para equipos de mucho tiempo de operación en que funcionan mas no producen.

2.4.2 Mantenibilidad. La mantenibilidad se define como la probabilidad de que un equipo sea restablecido a una condición especificada dentro de un periodo de tiempo dado, usando recursos determinados o también se puede definir como “la probabilidad de restablecer las condiciones específicas de funcionamiento de un sistema, en límites de tiempo deseados, cuando el mantenimiento es realizado en las condiciones y medios predefinidos”¹⁰

Esta puede ser estimada como se indica en la ecuación (10):

$$M(t) = 1 - e^{-ut} \quad (10)$$

Dónde:

M(t) Mantenibilidad

e Constante neperiana

¹⁰ MONCHY, F. A Função Manutenção. Editora Brasileira. Editora Duran. 1989

- μ Tasa de reparaciones
- t Tiempo previsto de reparación MTTR

Se representa por $M(t)$, es la función de distribución de la variable TTR (*Time to repair*), esto significa la probabilidad que la variable aleatoria tenga un valor igual o menor que un valor particular a t .

2.4.3 Distribución Weibull. En teoría de la probabilidad y estadística, la distribución Weibull es una distribución de probabilidad continua que se usa para describir la distribución de los tamaños de ciertas partículas.¹¹ La distribución Weibull se usa para el análisis y la predicción de fallas, también se usa para el cálculo del tiempo óptimo del mantenimiento.

Esta distribución se usa frecuentemente en el modelado de los tiempos de las fallas, cuando son proporcional a una potencia del tiempo.¹²

La función de densidad Weibull está dada por la ecuación (11):

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (11)$$

Donde:

$F(t)$ = Función acumulativa de fallas

t = Tiempo en cualquier momento

t_0 = Tiempo de referencia o parámetro inicial

η = Parámetro de escala o vida característica

β = Parámetro de forma

Los parámetros que definen la distribución Weibull son los siguientes:

¹¹ PHAM, Huyen. Handbook of Reliability Engineering. Springer. Springer. 2002

¹² WEIBULL, Waloddi. The New Weibull Handbook. 4ta ed. 2006

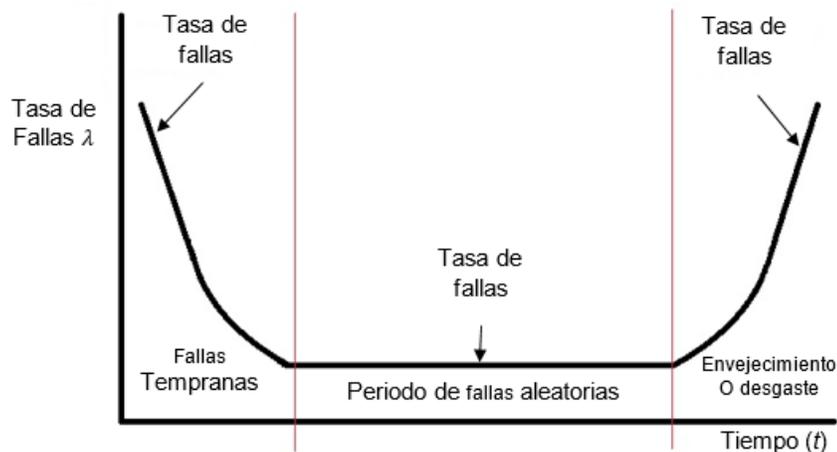
Beta (β): También llamado parámetro de forma, refleja la dispersión de los datos y determina la forma que toma la distribución.

Eta (η): Parámetro de escala o característica de vida útil, entre más alto las máquinas pueden ser más robustas o de trabajos de mayor duración.

Rho (ρ): Por definición la función de densidad de probabilidad generalmente se asume como cero, ya que se dificulta su cálculo. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula.¹³

2.4.4 Curva de la confiabilidad o curva de la bañera. Esta es una curva que representa los diferentes tipos de falla que un componente o equipo puede sufrir durante todo su ciclo de vida útil. La figura 2 representa los 3 componentes que forman la curva típica de flujo de fallas.

Figura 2. Curva de la bañera.



¹³ MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009

2.4.4.1 Fallas tempranas. Están representadas en la primera parte de la curva de la bañera, estas están asociadas a las fallas presentadas en equipos o componentes nuevos, las cuales pueden ser ocasionadas por problemas de producción, por defectos en la fabricación, fallas durante la instalación de los equipos, problemas de desensamble, etc.

2.4.4.2 Fallas aleatorias. Estas fallas ocurren de forma inesperada y pueden surgir por errores humanos durante el mantenimiento, fallas por factores externos como fallas debido a la naturaleza, a sobrecargas, al ser representada por una línea recta quiere decir que cada miembro de la población tiene la misma probabilidad de ocurrir.

2.4.4.3 Fallas por envejecimiento o desgaste. Son fallas debido a fatiga, obsolescencia, corrosión, fatiga o por un bajo nivel de mantenimiento.

2.5 PRONÓSTICOS

La Sociedad Americana de Control de Producción e Inventarios (APICS) considera que un pronóstico es un procedimiento objetivo, en el que se utiliza información recabada en un espacio de tiempo. Otros explican el pronóstico como el estudio de datos históricos para descubrir sus patrones y tendencias fundamentales y así utilizar este conocimiento en la proyección de los datos a periodos futuros.¹⁴

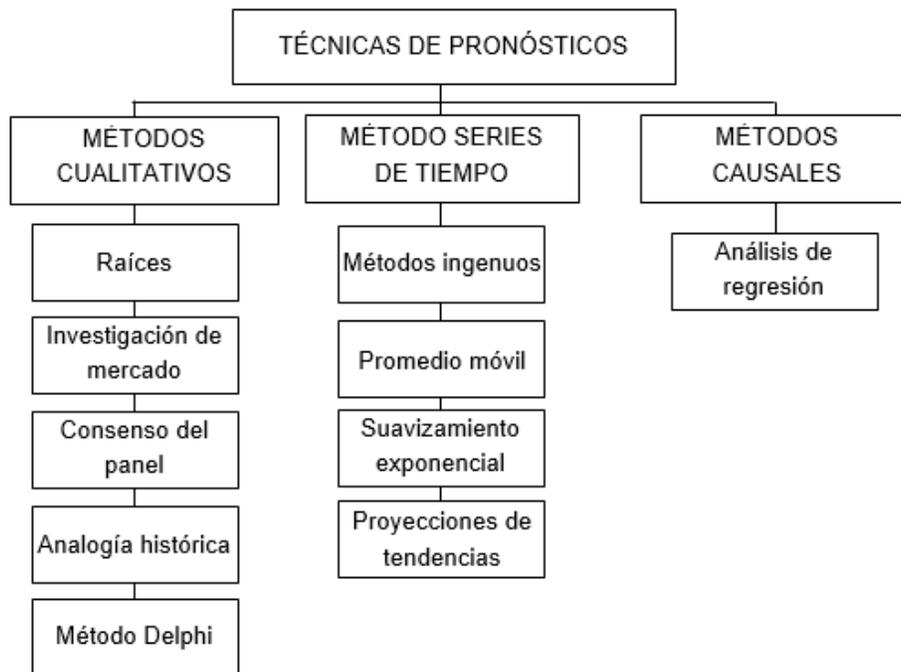
Se intenta predecir el comportamiento del elemento en forma que se tenga conocimiento permanente del estado y de la operatividad de los equipos, mediante

¹⁴ LARRARTE, Andrés. Propuesta de mejoramiento del proceso de producción de la planta trilladora de la cooperativa departamental cafetera de Cundinamarca (COODECAFEC). Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana. 2009.

la medición de diferentes variables.¹⁵ La necesidad de pronosticar surge debido a la incertidumbre con que operan las empresas y a pesar de esto se deben tomar decisiones que afectan el futuro. En situaciones como estas se necesitan los pronósticos para determinar cuándo ocurrirá el evento o cuando surgirá una necesidad, de forma que las acciones puedan ser tomadas a tiempo y apropiadamente.

Si se desea predecir el mantenimiento, lo primero a realizar es la medición del CMD, con lo cual se evalúa la posibilidad de predecir acorde a las reglas y leyes del mantenimiento. La evaluación de los parámetros calculados para las fallas y reparaciones permite identificar las directrices de cada uno de ellos y del sistema o componentes en general en el futuro cercano. La figura 3 ilustra varios métodos de pronósticos.

Figura 3. Métodos de pronósticos



Fuente: MAHENDRA GOR, Ravi. Forecasting Technique. In Industrial Statistics and Operational Management. 2009.

¹⁵ NAVARRO, Elola & MUGABURU, J. M. Gestión Integral de Mantenimiento. S.A. MARCOMBO. 1997.

La metodología más recomendada para conocer el futuro cercano, es pronósticos bajo el método de series temporales, usando los modelos clásicos (de ajuste por tendencia, los de suavización (Brown, Holt, Winter, X Census 11, etc) y los de descomposición (Winter, X11, etc) y los modernos (Metodología Box-Jenkins y A.R.I.M.A), mediante el uso y el desarrollo de toda la metodología estandarizada universalmente para realizar estos pronósticos, de tal forma que se garanticen resultados con buena bondad de ajuste (Goodness of Fit) entre pronósticos realizados y realidad¹⁶.

2.5.1 Series de tiempo. Una serie de tiempo (también conocida como serie histórica, cronológica o de tiempo) es un conjunto de valores, correspondientes a una variable, ordenados según el instante en que fueron tomados, y normalmente tomados a intervalos regulares de tiempo¹⁷. Los datos se pueden comportar de diferentes formas a través del tiempo, puede que se presente una tendencia, un ciclo; no tener una forma aleatoria, variaciones estacionales (anual, semestral, etc). Las observaciones de una serie de tiempo serán denotadas por $D_1; D_2, \dots, D_T$, donde D_t es el valor tomado por el proceso en el instante t .¹⁸

2.5.1.1 Modelos de series de tiempo. Los modelos de series de tiempo tienen un enfoque netamente predictivo y en ellos los pronósticos se elaborarán sólo con base al comportamiento pasado de la variable de interés. Se pueden distinguir dos tipos de modelos de series de tiempo.

¹⁶ MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009

¹⁷ PÉREZ GUZMÁN, Juan. (2014). Pronóstico De Demanda Y Precios De Energía En Un Mercado Eléctrico. Tesis Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p 1–113.

¹⁸ RIOS, Gonzalo (2008). Series de Tiempo. Universidad de Chile. [En línea]. Disponible en <<https://goo.gl/eYt4JP>>

➤ Modelos deterministas: Se trata de métodos de extrapolación sencillos en los que no se hace referencia a las fuentes o naturaleza de la aleatoriedad subyacente en la serie. Su simplicidad relativa generalmente va acompañada de menor precisión. Ejemplo de modelos deterministas son los modelos de promedio móvil en los que se calcula el pronóstico de la variable a partir de un promedio de los “n” valores inmediatamente anteriores.

➤ Modelos estocásticos: se basan en la descripción simplificada del proceso aleatorio subyacente en la serie. En término sencillos, se asume que la serie observada D_1, D_2, \dots, D_T se extrae de un grupo de variables aleatorias con una cierta distribución conjunta difícil de determinar, por lo que se construyen modelos aproximados que sean útiles para la generación de pronósticos.

2.5.1.2 Tipos de serie de tiempo.

➤ Serie no estacionaria: es aquella cuyas características de media, varianza y covarianza cambian a través del tiempo lo que dificulta su modelamiento. Sin embargo, en muchas ocasiones, si dicha serie es diferenciada una o más veces la serie resultante será estacionaria (procesos no estacionarios homogéneos).

➤ Serie estacionaria: es aquella cuya media y varianza no cambian a través del tiempo y cuya covarianza sólo es función del rezago. Gracias a estas características se puede modelar el proceso subyacente a través de una ecuación con coeficientes fijos estimados a partir de los datos pasados.

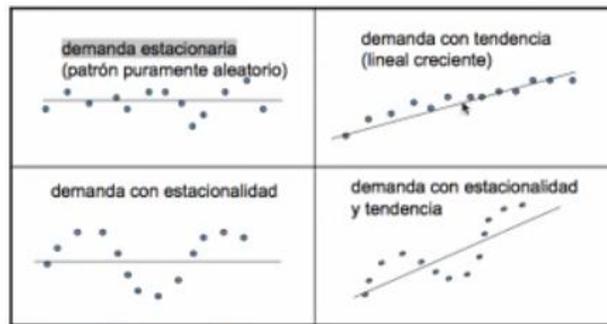
2.5.1.3 Clasificación de una serie de tiempo. Las características de una serie de tiempo pueden estar definidas por cuatro tiempos principales, a menudo llamados componentes de una serie de tiempo.

➤ Tendencia (T): representa el comportamiento predominante de la serie. Esta puede ser definida vagamente como el cambio de la media a lo largo de un extenso período de tiempo.

- Ciclo (C): caracterizado por oscilaciones alrededor de la tendencia con una larga duración, y sus factores no son claros. Por ejemplo, fenómenos climáticos, que tienen ciclos que duran varios años.
- Estacionalidad (E): es un movimiento periódico que se producen dentro de un periodo corto y conocido. Este componente está determinado, por ejemplo, por factores institucionales y climáticos.
- Aleatorio (A): son movimientos erráticos que no siguen un patrón específico y que obedecen a causas diversas. Este componente es prácticamente impredecible. Este comportamiento representa todos los tipos de movimientos de una serie de tiempo que no son tendencia, variaciones estacionales ni fluctuaciones cíclicas.

La figura 4, Muestra los diferentes patrones de las series de tiempo, según su tipo.

Figura 4. Patrones de las series de tiempo



Fuente: Gerprod, 2017

2.6 PRONÓSTICO POR SERIES TEMPORALES

La utilización de series de tiempo, es una buena opción para poder definir variables, tanto positivas como negativas o de diferente tipo (social, económica, física, biológica, etc.) donde estas puedan llegar a afectar el proyecto durante un periodo, todos estos proyectos cuentan con un plan futuro para llevar a cabo y tener una probable sobrevivencia de este, pero estos proyectos además de su visión futura necesitan conocerlo con predicción con el fin de prevenir. La idea es que la información del patrón de observaciones pasadas puede inferirse y usarse para

pronosticar valores futuros de las series. En la tabla 1 se presentan algunos de los métodos usados para el pronóstico con series de tiempo y sus características principales.

Tabla 1. Métodos por series de tiempo para pronósticos

Métodos por series de tiempo	Descripción del método	Usos	Exactitud en un plazo			Identificación del punto de retorno	Costo relativo
			Corto	Mediano	Largo		
Promedio móvil	El pronóstico de basa en un promedio aritmético ponderado de un número de puntos de datos del pasado	Planeación de corto a mediano plazo para inventarios, niveles de producción y programación. Es bueno cuando hay muchos productos	Mala a muy buena	Mala	Muy mala	Mala	Bajo
Suavización exponencial	Similar al promedio móvil y da un mayor peso exponencial a los datos más recientes. Bien adaptado para usarse con computadoras y cuando es necesario pronosticar un gran número de artículos	Igual que el promedio Móvil	Regular a muy buena	Mala a buena	Muy mala	Mala	Medio
Métodos matemáticos	Un modelo lineal o no lineal ajustados con los datos de series de tiempo, normalmente mediante regresión. Incluye las líneas de tendencia, polinomios, logaritmos lineales, series de Fourier, etc.	Igual que el promedio móvil pero con limitaciones debido al costo y su uso con pocos productos	Muy buena	Regular a buena	Muy mala	Mala	Bajo a medio
Box-Jenkins	Métodos de autocorrelación que se usan para identificar las series de tiempo subyacentes para ajustar el "mejor" modelo. Se necesitan aproximadamente 60 puntos de datos del pasado	Limitado debido al costo de los productos que requieren de pronósticos muy exactos a corto plazo	Muy buena a excelente	Regular a buena	Muy mala	Mala	Medio alto

Fuente: SCHROEDER, Roger. Administración de operaciones, toma de decisiones en la función de operaciones. McGraw Hill. 1996.

2.6.1 Evaluación de los métodos de pronóstico por serie de tiempo. Para la evaluación del desempeño predictivo se emplean diferentes indicadores que cuantifican que tan cerca está la variable pronosticada de su serie de datos correspondiente¹⁹, que a continuación se detallan:

2.6.1.1 Medición del error. El error (ver ecuación (12)) se define como la diferencia entre el pronóstico para el periodo T (F_t), y el valor real de la serie realizado para el periodo T (D_t .)

$$e_t = F_t - D_t \quad (12)$$

e_t = Error

D_t = Valores observados en el periodo t

F_t = Pronóstico calculado para el periodo t, hecho en t-1

T = Números de periodos en los cuales se calculó el pronóstico

Existen varias medidas comunes para estimar el error del pronóstico, estas son:

➤ Error Medio (EM): Nos dice que tan centrado o descentrado están los pronósticos de los originales como se observa en la ecuación (13).

$$ME = \frac{\sum_{t=1}^T e_t}{T} \quad (13)$$

➤ Deviación Media Absoluta (MAD): Da la idea en términos de magnitud (ecuación (14)).

¹⁹ RIOS, Gonzalo (2008). Series de Tiempo. Universidad de Chile. [En línea]. Disponible en <<https://goo.gl/eYt4JP>>

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^T |e_t|}{T} \quad (14)$$

➤ Error Cuadrático Medio (MSE): Similar a la varianza de una muestra aleatoria (ecuación (15)).

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^T e_t^2}{T} \quad (15)$$

➤ Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE): Elimina la ambigüedad de unidades, ya que no depende de los valores de la variable, es una de las medidas más utilizadas. Mide el valor medio del error en términos porcentuales al valor real de la variable (ecuación (16)).

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^T \left| \frac{e_t}{D_t} \right|}{T} \quad (16)$$

2.6.1.2 Desviación estándar del error

La desviación estándar es la medida de dispersión por excelencia, A partir de ella, si se considera que los errores están normalmente distribuidos, una aproximación de la desviación estándar del error se muestra en la ecuación (17):

$$\sigma_e \sim 1.25MAD \quad (17)$$

2.6.2 Métodos de pronóstico por serie de tiempo.

Los métodos de análisis de series de tiempo consideran el hecho que los datos tomados en diversos periodos de tiempo pueden tener algunas características de autocorrelación, tendencia o estacionalidad que se debe tomar en cuenta.

2.6.2.1 Métodos para pronosticar series estacionarias. Se analizarán dos técnicas populares para pronosticar series de tiempo exponencial. Una serie de tiempo exponencial es aquella en la que cada observación puede representarse por medio de una constante más una fluctuación aleatoria como se muestra en la ecuación (18).

$$D_t = \mu + e_t \quad (18)$$

Donde μ es una constante desconocida que corresponde a la media de la serie y e_t es un error aleatorio con media cero y varianza σ . (Nahmias, 2007).

➤ Promedios móviles simple: un promedio móvil del orden N es sencillamente el promedio aritmético de las observaciones N más recientes. (Nahmias, 2007) (ecuación (19)).

$$S_t = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t D_i; \quad F_{t+1} = S_t \quad (19)$$

$$S_t = \left[\frac{1}{N} (D_t - D_{t-N}) \right] + S_{t-1}$$

Con esta última ecuación se evita recalculer el promedio de las últimas N observaciones, cada vez que surge una nueva observación de demanda.

➤ Suavización exponencial simple: otro método muy popular para las series de tiempo estacionarias es el suavizamiento exponencial. El pronóstico actual es el promedio ponderado del último pronóstico y el valor actual de la variable.²⁰ (ecuación (20)).

$$F_t = \alpha D_{t-1} + (1-\alpha)F_{t-1} \quad (20)$$

²⁰ NAHMIA, Steve. Análisis de la producción y las operaciones. McGraw Hill. 2007

Alpha (α) es la constante de suavizamiento que determina la ponderación relativa puesta en la observación de la variable actual. Este valor debe ser $1 > \alpha > 0$

$1 - \alpha$ = Peso asignado a las observaciones pasadas de la demanda.

Para la aplicación de cualquiera de los dos métodos expuestos anteriormente se deben tener en cuenta algunos aspectos:

- Aplica a un conjunto de ponderaciones decrecientes a todos los datos pasados.
- La constante de suavizamiento juega el mismo papel que el N en los promedios móviles (N pequeño α grande asigna mayor peso a los datos actuales).
- Si α es grande, se da mayor ponderación a la observación actual, lo que da como resultado pronósticos que reaccionan rápidamente a los patrones de demanda, pero presentan mayor variación de periodo a periodo. Si α pequeño, los pronósticos son más estables.
- El mejor valor de α será aquel que minimice los errores.

2.6.2.2 Métodos para pronosticar basados en la tendencia. Se considera a dos métodos de pronóstico que representan específicamente a una tendencia en los datos: El análisis de regresión y el método de Holt. El análisis de regresión es un método que ajusta una línea recta a un conjunto de datos. El método Holt es un tipo de suavizamiento exponencial doble que permite un suavizamiento simultáneo en la serie y en la tendencia.²¹

➤ Regresión lineal simple: Existe una relación entre la variable X (independiente) y la variable Y (dependiente) que puede representarse mediante una línea recta (ecuación (21)).

²¹ NAHMIAS, Steve. Análisis de la producción y las operaciones. McGraw Hill. 2007.

$$Y = mx + b \quad (21)$$

Los valores de b y m se eligen de manera que se minimice la suma de las distancias cuadráticas, entre la línea de regresión y los puntos de datos como se observa en la ecuación (22).

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (22)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

Una buena forma de determinar si la regresión es adecuada, es a través del coeficiente correlación, el cual mide el grado de dependencia entre los dos conjuntos de datos dados.

➤ Suavización exponencial doble usando el método de *Holt*: Requiere de la especificación de dos constantes de suavizamiento:

α = Suaviza el valor de la serie (promedio-estacionario)

β = Suaviza la tendencia (pendiente de los datos)

Las constantes de suavizamiento pueden ser las mismas; sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones se da mayor estabilidad al estimado de la pendiente que al de la constante, es decir $\beta \leq \alpha$.

Por otra parte, deben utilizarse dos parámetros para la estimación del pronóstico, estos son:

S_o = Corte de la recta de regresión (b)

G_o = Pendiente de la recta de regresión (m)

Para actualizar estos valores, se emplean la siguiente ecuación (23):

$$\begin{aligned} S_t &= \alpha D_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + G_{t-1}) \\ G_t &= \beta (S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)G_{t-1} \end{aligned} \quad (23)$$

El pronóstico de τ pasos adelante, hecho en el periodo t , que se denota como $F_{t+\tau}$, está dado por la ecuación (24):

$$F_{t+\tau} = S_t + \tau G_t \quad (24)$$

2.6.2.3 Métodos para pronosticar series estacionales y con tendencia.

➤ Suavización exponencial triple usando el método de *winters*: Una serie estacional es aquella que tiene un patrón que se repite cada N periodos, pero algún valor de N (que es cuando menos 3). A continuación, se presentará el método *Winters* cuando también se presenta una tendencia.²²

Un tipo de suavizamiento exponencial triple se muestra en la ecuación (25).

$$D_t = (\mu + G_t)c_t + e_t \quad (25)$$

μ = Señal base o intercepción en el tiempo $t=0$, excluyendo la estacionalidad.

G_t = Componente de tendencia o pendiente

c_t = Componente estacional multiplicativo en el periodo t

e_t = Error

Estas ecuaciones pueden tener diferentes constantes de suavizamiento, que se etiquetaran como α, β, γ .

²² NAHMIAS, Steve. Análisis de la producción y las operaciones. McGraw Hill. 2007.

- La serie. El nivel actual de la serie desestacionalizada, S_t , está dado por la ecuación (26).

$$S_t = \alpha \left(\frac{D_t}{c_{t-N}} \right) + (1-\alpha)(S_{t-1} + G_{t-1}) \quad (26)$$

Al dividir el factor estacional apropiado, se está desestacionalizando la observación de la variable más nueva.

- La tendencia. La tendencia se actualiza en una forma similar a la del método de Holt (ecuación (27)).

$$G_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1-\beta)G_{t-1} \quad (27)$$

- Los factores estacionales.

$$c_t = \gamma \left(\frac{D_t}{S_t} \right) + (1-\gamma)c_{t-N} \quad (28)$$

La relación de la observación de variable más reciente sobre el estimado actual de la variable desestacionalizando da como resultado el estimado actual del factor estacional. Después, esto se promedia con el mejor estimado previo del factor estacional c_{t-N} . Cada vez que se actualiza un factor estacional, es necesario normalizar los N factores más recientes para que sumen N. Por último, el pronóstico realizado en el periodo t para cualquier periodo futuro $F_{t+\tau}$ está dado por la ecuación (29).

$$F_{t+\tau} = (S_t + \tau G_t) c_{t+\tau-N} \quad (29)$$

Considerando que $t \leq N$. Si $N < \tau \leq 2N$, el factor estacional adecuado será $c_{t+\tau-3N}$, y así sucesivamente.

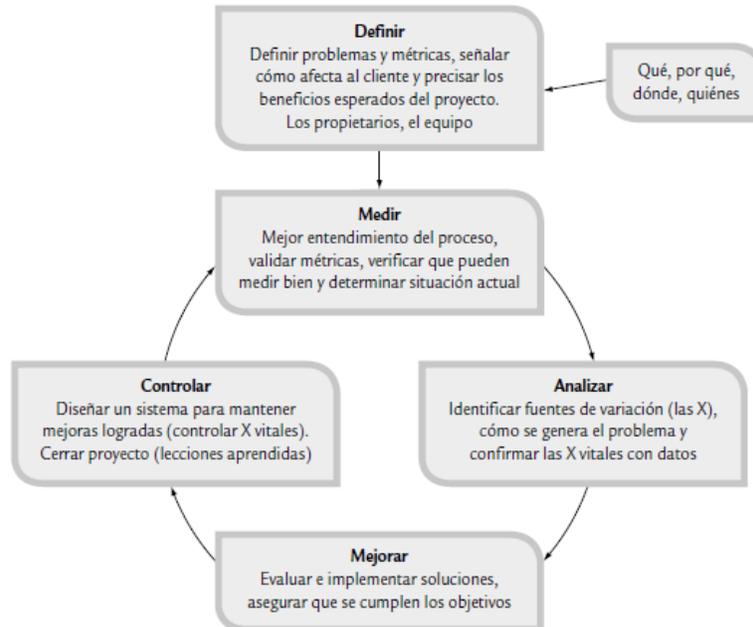
2.7 CICLO DMAIC

El Ciclo DMAIC es una herramienta usada en la metodología de mejora Six Sigma, que puede ser usada como herramienta para la formulación de planes de mejora. Ofrece una estructura que siguiéndola garantiza el objetivo de mejorar un problema llegando a la raíz del mismo.²³

D	Define-definir	Definir la oportunidad o mejora
M	Measure-medir	Evaluar los datos disponibles
A	Analyze-analizar	Identificar causas potenciales
I	Improve-Mejorar	Proponer alternativas de solución
C	Control-controlar	Proponer controles para asegurar que la acción de mejora se ejecute

La figura 5, describe las cinco etapas de la metodología DMAIC.

Figura 5. Las cinco etapas de la metodología DMAIC



Fuente: GUTIÉRREZ, Humberto & DE LA VARA SALAZAR, Román. Control estadístico de calidad y seis sigma. Mc Graw Hill Interamericana Editores. Vol. 2da. ed. 2009.

²³ ESCALANTE, Valencia. Seis Sigma Metodología y técnicas. LIMUSA. 2005

2.7.1 Pasos metodología DMAIC. En esta parte se detallará cada una de las etapas de la metodología DMAIC.

2.7.1.1 Definir (D). En esta etapa de definición se precisa que se va a hacer, los beneficios esperados y las métricas con las que se medirá el éxito. A continuación se indican los pasos para esta etapa.

➤ Definir la oportunidad o el problema técnico: Una adecuada descripción de un problema debe contar con 4 componentes, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Componentes para definir la oportunidad o problema.

Objeto	Defecto
¿Cuál es la cosa involucrada en el problema?	¿Cuál es el problema que le pasa a la cosa involucrada?
Extensión	Impacto
¿Qué tan grande es el problema?	¿Cuál es el efecto del problema o cual sería el beneficio en caso de resolverse?

El enunciado no debe contener causas o soluciones ya que esto terminaría limitando el análisis del problema y la identificación de otras posibles soluciones.

Se debe asegurar que la definición del problema sea factible, de tal manera que se pueda resolver en un período de 90 días aproximadamente.

➤ Identificar involucrados: se debe identificar a los principales involucrados en la oportunidad o problema contestando las siguientes preguntas:

- ¿Quién tiene que aprobar los cambios en el proceso?
- ¿Quién participa en el proceso?
- ¿Quiénes son los clientes y proveedores del proceso?

- ¿Quién es el usuario final del proceso o equipo?
- ¿Quién es impactado por el problema?
- ¿Quién tiene mayor conocimiento sobre el problema?
- ¿Quién puede sabotear los esfuerzos para solucionar el problema?

Definir quiénes son los responsables de las tareas, actividades y de los procesos de trabajo del proyecto.

2.7.1.2 Medir (M). El objetivo general de esta segunda fase es entender y cuantificar mejor la magnitud del problema o situación que se aborda con el proyecto²⁴

En esta sección se identifican dos tipos de proyectos:

- Defectos: En los que se reducen los defectos, errores, fallas, se reduce la variabilidad y se mejora la calidad.
- Velocidad: En los que se incrementa la velocidad o capacidad, se reduce tiempo y se optimizan recursos.

➤ Definir indicadores y recolectar datos: en este paso se requiere medir la magnitud del problema antes y después del proyecto. Las mediciones se realizan sobre dos de los componentes de la descripción del problema: el defecto y el impacto.

A los indicadores relacionados con el defecto se les conoce como indicadores técnicos. A los indicadores relacionados con el impacto se les conoce como indicadores del negocio.

Los indicadores técnicos pueden ser de dos tipos:

- Primarios: Lo que se quiere mejorar
- Secundarios: Lo que no se quiere empeorar

²⁴ GUTIÉRREZ, Humberto & DE LA VARA SALAZAR, Román. Control estadístico de calidad y seis sigma. Mc Graw Hill Interamericana Editores. Vol. 2da. ed. 2009.

➤ Establecer desempeño objetivo: una vez determinado el desempeño inicial de la variable de respuesta, se debe determinar un valor objetivo a alcanzar mediante el proyecto en curso.

Esto se puede hacer siguiendo alguno de los siguientes métodos:

- Benchmark: Consiste en recopilar información sobre la competencia, identificar o destacar los aspectos más relevantes y que dan los mejores resultados y aplicarlos

- Reglas empíricas:

Si el desempeño inicial es $<3\sigma$, el objetivo debe ser 70% de reducción de defectos

Si el desempeño inicial es $>3\sigma$, el objetivo debe ser 90% de reducción de defectos

- Demanda o requerimientos: Consiste en exigencias impuestas por diferentes actores (presidente de la empresa, socios, dueño del proceso. Etc).

➤ Mapear proceso: se debe realizar un mapa detallado del proceso como “realmente está” operándose, no como cree que debería ser.

2.7.1.3 Analizar (A). En la tercera etapa del DMAIC, es donde se identifican y confirman la(s) causa(s) raíz del problema, entender cómo es que éstas generan el problema y conformar las causas con datos.

➤ Establecer las posibles causas de un problema: para encontrar las causas potenciales de un problema, existen varias metodologías como:

- Tormenta de ideas: Es una técnica en que un grupo de personas aportan libremente varias ideas sobre un tema específico o para solucionar un problema determinado.

Los pasos son:

- Cada integrante del proyecto de manera individual genera ideas de posibles causas del problema planteado.
- Reunir las ideas de todos

- Clasificar las ideas en elementos comunes. (Se puede usar el diagrama causa-efecto)

- Agrupar en una sola las que sean iguales

• 5 Porqués: Es una metodología de preguntas para el análisis de causa raíz. Los 5 porqués no son obligatorios. Una vez que al equipo le sea difícil responder un porqué, es necesario parar y no hacer más preguntas. Se deben registrar las preguntas con sus respectivas respuestas.

• Diagrama causa-efecto: Es una técnica que permite identificar las causas del problema y visualizar de manera fácil las causas y las relaciones entre ellas. Las categorías más comunes son:

- 6Ms: maquinaria, mano de obra, método, materiales, medición, medio ambiente

- 4Ps: políticas, procedimientos, población (personas) y planta.

- 5Ws: quién, qué, cuándo, dónde, porqué.

➤ Identificar causa raíz

2.7.1.4 Mejorar (I). El objetivo en esta etapa es proponer e implementar soluciones que atiendan las causas raíz. La clave es pensar en soluciones que ataquen la fuente del problema (causas) y no el efecto.²⁵

➤ Generar la mayor cantidad de soluciones posibles y clasificar las alternativas de solución, por medio de herramientas como tormenta de ideas.

➤ Seleccionar la mejor alternativa para solucionar la(s) causa(s) del problema: Una vez generadas las diferentes alternativas de solución es importante evaluarlas mediante una matriz (ver figura 7).

²⁵ GUTIÉRREZ, Humberto & DE LA VARA SALAZAR, Román. Control estadístico de calidad y seis sigma. Mc Graw Hill Interamericana Editores. Vol. 2da. ed. 2009.

Figura 7. Matriz de clasificación de soluciones.

Impacto	Alto		
	Bajo		
		Fácil	Difícil

Facilidad de implementación

- Establecer plan de implementación: Luego de definir y priorizar las acciones a implementar, es necesario realizar un plan de implementación.
- Hacer seguimiento a la implementación y detectar desviaciones para su corrección que garantice el cumplimiento del plan.

2.7.1.5 Controlar (C). Una vez que las mejoras deseadas son alcanzadas, en esta etapa se diseña un sistema que mantenga las mejoras logradas para el posterior cierre del proyecto. El objetivo de esta etapa es el de prevenir que los problemas que tenía el proceso no se vuelvan a repetir, impedir que las mejoras y conocimientos obtenidos se olviden, mantener el desempeño del proceso y alentar a la mejora continua.

Las acciones de control deben ser establecidas de acuerdo a tres niveles:

- Estandarizar el proceso: en este se deben establecer controles para asegurar la permanencia, es necesario definir la manera de asegurar que la mejora permanezca en el tiempo, independientemente de los cambios en el sistema y estructuras que forman el proceso, tratando de no depender de controles manuales y vigilancia sobre el desempeño. En otras palabras, se deben buscar cambios permanentes en el proceso, para ello se puede recurrir a los siguientes controles:

- Controles duros: en estos lo ideal es tener, un sistema robusto, que se mantenga independientemente de la persona, condiciones ambientales y variación en las entradas de proceso.
- Automatización: aunque el proceso no sea insensible a las variaciones de entrada, que éste se auto-ajuste para compensarla y asegurar una salida constante.
- Sistema a prueba de falla (Poka-Yoke): que el sistema no permita variación en las entradas al proceso y, por lo tanto, no habrá variabilidad en las salidas del mismo.

➤ Documentar el plan de control: Se busca trabajar para mejorar o desarrollar nuevos documentos que faciliten el apego a los procedimientos estándar de operación del proceso. La estandarización de la documentación contempla procedimientos bien escritos, videos y hojas de trabajo ilustradas, otras alternativas son la capacitación.

➤ Monitorear el proceso: Los indicadores de control son indicadores de desempeño de las variables claves del proceso, así como sobre variables de salida crítica, para mantener alta atención en las variables clave de control mediante motivación permanente en los agentes de control hasta lograr formar un hábito o cultura. Las herramientas para analizar y monitorear el desempeño de un proceso son las cartas de control.

- Definir los indicadores de control.
- Establecer una herramienta en la que se estará reportando el desempeño de los indicadores (tablero de control).
- Definir el medio de seguimiento al tablero de control (Reunión semanal, mensual)
- Determinar mecanismos de premios por el buen desempeño y actuar ante el pobre desempeño.

➤ Controles suaves: Son los que aseguran que cuando llegue nuevos responsables del proceso, estos mantendrán el control del proceso.

- Especificaciones de producto
- Condiciones de operación

- Materias primas autorizadas
 - Procedimientos
 - Listas de verificación
 - Tipo, unidades y equipo de medición
- Evaluar nuevos desempeños y beneficios: Identificar y cuantificar los beneficios obtenidos
- Evaluar el nuevo desempeño del proceso
 - Identificar los beneficios
 - Cuantificar en términos económicos los beneficios obtenidos
 - Reportar los beneficios
- Cerrar y difundir el proyecto: Luego de realizar cada uno de los pasos de la metodología DMAIC y de realizar todos los análisis necesarios para confirmar que la causa raíz fue identificada se debe entregar el proyecto, difundir lo realizado, así como los logros alcanzados.

Figura 8. Formato DMAIC propuestas de mejora.

Título			
Necesidad del negocio a ser atendida			
Alcance			
Roles y responsabilidades			
Fecha inicio		Fecha planeada para finalizar	
1. Definir (Problema, oportunidad, etc.)	4. Mejorar (Acciones propuestas)		
2. Medir (Métricas, indicadores)	5. Controlar		
	Beneficios		
3. Analizar (Encontrar causa raíz)			
	Estandarizar		
	Oportunidad de réplica		

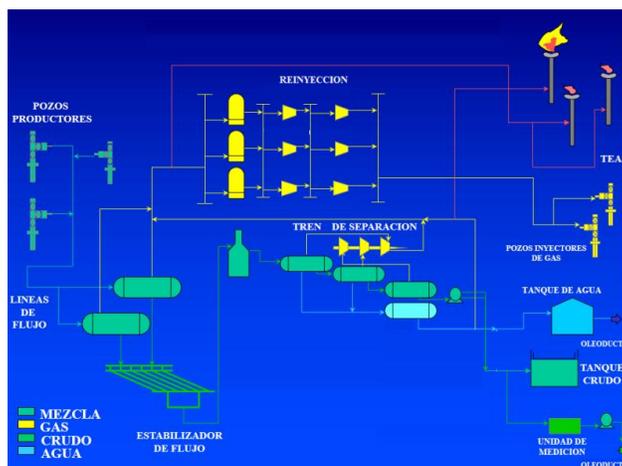
Para la presentación de las propuestas de mejora de los problemas identificados durante el desarrollo del trabajo se seguirá el siguiente formato es mostrado en la figura 8.

2.8 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN

Este proyecto se desarrolló para una planta que desarrolla actividades de explotación y producción de hidrocarburos ubicada en Colombia, el análisis fue realizado específicamente para el área de producción, la cual cuenta con equipos de separación, generación, reinyección. La función de esta planta es extraer petróleo y gas natural de la tierra para luego ser transportados a una planta de refinación.

2.8.1 Descripción del proceso. El petróleo crudo una vez extraído del pozo, sube por los cabezales de producción que se encuentran ubicados en la parte superior (boca del pozo). Las líneas de producción transportan los fluidos de producción desde la plataforma de los pozos hasta la planta ingresando al área de proceso, donde se dirige al área de separación, donde se separan los fluidos de entrada, en gas y líquidos, es decir se separa el gas, el agua y el crudo, debido a que el petróleo en su forma natural se encuentra en los pozos acompañado de gas, agua, sedimentos e impurezas, debe ser separado de cada uno de estos elementos.

Figura 9. Esquema general planta de producción.



Fuente: Empresa

Esta separación ocurre en los trenes de separación, los cuales son unas especies de tanques donde el petróleo crudo entra por la parte superior y debido a la gravedad él se va separando. Los sedimentos se van al fondo, el agua se queda en la parte media entre los sedimentos y el crudo y el gas en la parte superior. Luego el gas separado va al área de procesamiento de gas y el agua y el crudo fluyen al área de separación de crudo, la cual consiste en un calentador de petróleo crudo y tres etapas de separación. La Figura 9 muestra el esquema general de la planta de producción.

El gas resultante de esta separación se dirige al área de compresión de gas de proceso donde es comprimido y luego enviado al área de procesamiento de gas, donde se reúne con el gas resultante de la separación en la primera etapa del proceso. Luego de esta área de procesamiento de gas donde se produce un gas más limpio es enviado al área de compresores de gas de reinyección, donde el gas es reinyectado a los pozos (Sistema de reinyección); el crudo resultante del proceso de separación es enviado por medio de oleoductos a los puntos de refinación o refinerías.

2.8.2 Descripción general de los sistemas. El campo incluye las plataformas de pozos productores e inyectores de gas, las líneas de conducción de fluidos de producción y las instalaciones centrales de procesamiento, para producir crudo y gas para inyección.

2.8.2.1 Recolección de crudo. Este sistema está diseñado para aceptar los fluidos multifásicos de pozos crudo, agua, gas, transportados por la red de líneas del campo. El sistema de recolección consiste de un *manifold* de entrada, dos cabezales de producción y un *slug catcher*.

2.8.2.2 Sistema teas. Las teas están diseñadas para recibir los alivios de los equipos de la planta. El diseño considera 2 trenes de crudo y dos trenes de compresión de gas.

2.8.2.3 Sistema drenaje cerrado. El sistema de drenaje cerrado está diseñado para recibir el drenaje de fluidos aceitosos de equipo y tubería, y reciclarlos para su reprocesamiento.

2.8.2.4 Sistema separación de crudo. El sistema está diseñado para aceptar los fluidos multifásicos crudo, agua, gas procedentes del *slug catcher*. Consiste de un calentador de petróleo crudo, tres etapas de separación, bombas de recirculación de crudo y enfriadores.

2.8.2.5 Sistema compresión de gas de proceso. El sistema está conformado por dos trenes de compresión de gas de proceso procedente de los separadores de los trenes de crudo. Los gases provenientes del sistema de separación de crudo son comprimidos y enviados al sistema procesamiento de gas.

2.8.2.6 Sistema procesamiento de gas. El sistema está diseñado para producir un gas limpio y una carga de gas seco al área de compresores de gas de reinyección. El secado de gas es obtenido usando las vasijas contactoras con trietilen glicol.

2.8.2.7 Sistema regeneración. El proceso de regeneración de glicol es un sistema convencional que incluye una modificación denominada *Coldfinger* por medio de la cual se logra un glicol regenerado de la más alta pureza.

2.8.2.8 Sistema compresores gas de reinyección. Los gases que comprimen los compresores de reinyección provienen de las vasijas de entrada al slug catcher y de los gases comprimidos por el compresor de gas de proceso. Cada compresor está diseñado para comprimir 430 millones de piés³ de gas con una presión de descarga final de los compresores de alta presión de 6.285 psig.

2.8.2.9 Sistema medición, transferencia y tanques de almacenamiento. Medición y transferencia de crudo en especificaciones, hasta las instalaciones de transporte.

2.8.2.10 Sistema tratamiento de agua de producción. El sistema está conformado por dos tambores desgasificadores, un tanque de agua de producción, bombas para agua de producción y un tanque desnatador de aceite.

2.8.2.11 Sistema inyección de químicos. El sistema de inyección de químicos proporciona químicos para inyección en las corrientes de proceso. Los químicos más utilizados son inhibidores de corrosión, desmulsificantes, antiespumantes y depresores de fluidez.

2.8.2.12 Sistema gas combustible. El sistema de gas combustible se diseñó para entregar gas de alta presión a las turbinas de gas de los compresores de reinyección, las unidades de generación de potencia y gas al calentador de crudo; gas combustible de baja presión para los rehervidores de regeneración de glicol, el horno de calentamiento de crudo, los pilotos de la tea y las purgas de gas combustible.

2.8.2.13 Sistema aire de instrumentos. El sistema genera aire para instrumentación de la planta y servicios de apoyo.

2.8.2.14 Sistema nitrógeno. Durante la operación normal, el sistema suministra nitrógeno para purga, a vasijas de techo fijo con cobertura y gases inertes despojados al aceite de sello en los compresores de reinyección.

2.8.2.15 Sistema generación eléctrica. Los generadores eléctricos son los proveedores de energía eléctrica. Los generadores eléctricos están accionados por turbinas a gas el cual puede ser reemplazo automáticamente por combustible diésel cuando falla el suministro de gas.

2.8.2.16 Sistema diésel. El sistema combustible diésel provee un volumen de almacenamiento para el consumo rutinario y el consumo de emergencia.

2.8.2.17 Sistema contraincendios. El sistema integrado de control y seguridad está geográficamente distribuido alrededor del campo, realiza la supervisión y control de las unidades de producción.

3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

En este capítulo se presenta el análisis de los datos de mantenimiento de la planta, donde se contempla las diferentes actividades de mantenimiento realizadas y registradas en el CMMS²⁶. Estos datos fueron recolectados y clasificados, extraídos de los reportes de mantenimiento realizados, donde se relacionan los diferentes tipos de mantenimiento empleados en la planta, preventivos, correctivos y predictivos. Lo que se busca es identificar los pocos aspectos vitales que afectan el proceso, esto se realizará con la ayuda de los diferentes gráficos como tortas, diagramas de frecuencia y análisis de Pareto.

Para determinar e identificar los “malos actores” de la planta, la información se construye con información registrada en el CMMS, información de los mantenimientos realizados, los cuales se encuentran clasificados como Preventivos (PV), son los realizados por estrategia de manteniendo, y los mantenimientos correctivo (CO), son los llamados de emergencia y los correctivos programados, también en esta información se encuentra los costos de mantenimiento de repuestos y las horas hombre (HH) usadas en cada una de la ordenes de trabajo, entre otros.

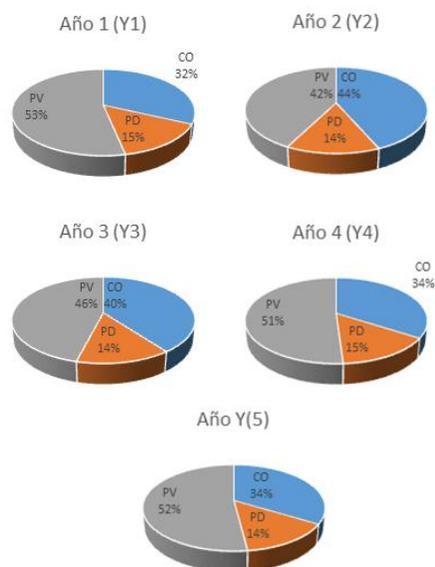
Como principal herramienta de análisis se usa el método de análisis de Pareto, el cual es usado para identificar la proporción de eventos más significativos, se usa para determinar prioridades acorde al tiempo fuera de servicio, costos del mantenimiento, número de falla, por medio de su representación gráfica representado por el histograma de Pareto.

²⁶ CMMS: Acrónimo de computerized maintenance management system, es una herramienta de software que ayuda en la gestión de los servicios de mantenimiento de una empresa.

3.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS DATOS DE MANTENIMIENTO DE LA PLANTA

En la figura 10 se observa el comportamiento del mantenimiento desde el Año 1 hasta el Año 5, el gráfico describe que en el Año 2 y Año 3 se presenta un incremento del mantenimiento correctivo.

Figura 10. Gráficos % mantenimientos año 1 - Año 5.



La proporción adecuada de mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo, en algunas investigaciones se encuentra en un 80% de mantenimiento preventivo y un 20% de mantenimiento correctivo; otros autores muestran el 70% - 30%; los valores son hallados según la experiencia e investigaciones, algunos valores sugeridos para realizar el mantenimiento con una relación horas/hombre es dedicar el 70% en mantenimiento programado y un 30% en mantenimiento correctivo no programado, dando como resultado alta fiabilidad, disponibilidad y una relación costo/beneficio razonable.

Surge la pregunta ¿por qué no es mejor un 85% de Preventivo, ahorrando más paradas de producción y personal? Porque la experiencia y las estadísticas indican que el “equilibrio óptimo” está en un 80% de Preventivo y un 20% de Correctivo ya que el costo de reducir el mantenimiento correctivo del 20% al 15% o menor es, en general, muy alto, y puede reducir considerablemente la rentabilidad. Esto sería relevante para las empresas con procesos productivos continuos muy específicos, con paradas técnicas de costos muy elevados (personal técnico especializado, arranques de procesos técnicos, con paradas muy costosas, pérdida de clientes por la no producción, el cual es el caso de las planta objeto de estudio de este proyecto, sin embargo en caso opuesto las otras empresas podrían buscar un objetivo de 60% de mantenimiento preventivo y 40% de mantenimiento correctivo. En la tabla 2 se observa los porcentajes adecuados de cada uno de los tipos de mantenimiento según estudios de mercado realizados.

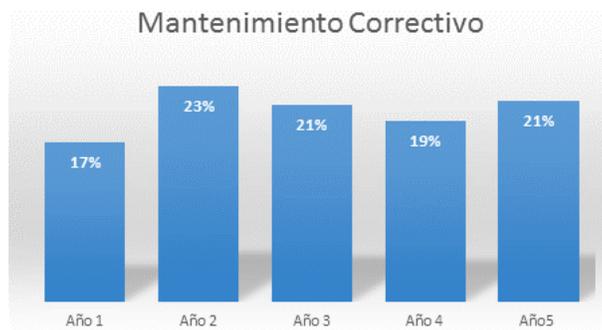
Tabla 2. Benchmark de las mejores prácticas de mantenimiento.

Categoría	Benchmark
Mantenimiento planeado	> 85%
Mantenimiento reactivo	< 15%
Emergencias	< 10%

Fuente: WIREMAN, Terry. Benchmarking BEST Practices in Maintenance Management. Industrial Press, Inc. Industrial Press, Inc. (2003).

En la figura 11 se observa que la empresa se encuentra aproximadamente en un 70% de mantenimiento preventivo y un 30% de mantenimiento correctivo. Esto puede asociarse a una deficiente estrategia o a la existencia de redundancia de equipos lo cual sugeriría a usar una estrategia a falla de los equipos.

Figura 11. Mantenimiento correctivo.



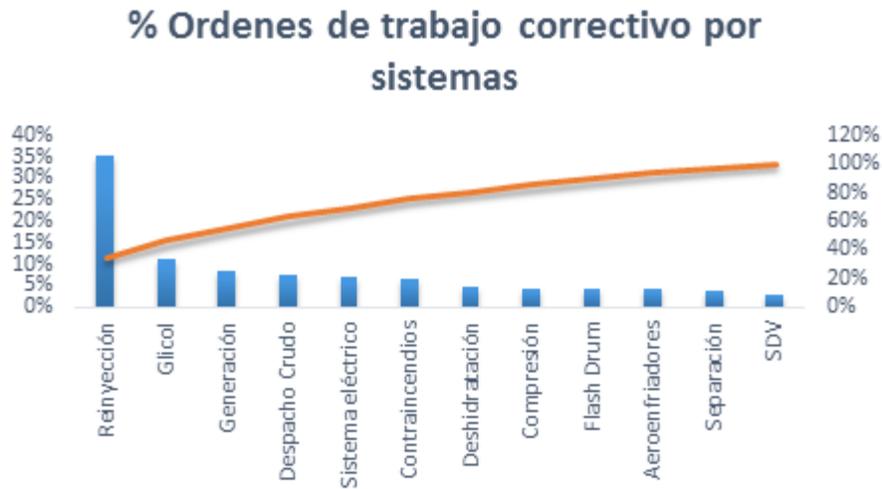
En la figura 11 se muestra la tendencia de las órdenes de mantenimiento correctivas a través de los años objeto de estudio, las cuales se han mantenido en un promedio de un 20%. En la figura 12 se observa que la disciplina de instrumentación, con un 44% es la disciplina de mantenimiento que realizó una mayor cantidad de mantenimiento correctivo.

Figura 12. Distribución mantenimiento correctivo por disciplinas



En la figura 13, **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los sistemas más relevantes de la planta, como objeto de estudio se seleccionaron los sistemas que tenían una cantidad mayor a 100 órdenes de trabajo de mantenimiento durante los 5 años, donde se puede observar que el 35% de las órdenes están relacionadas al sistema de reinyección y un 11% al sistema de glicol.

Figura 13. % Órdenes de trabajo de mantenimiento correctivo por sistemas.



Debido a los resultados obtenidos se dice que los sistemas de Reinyección, Glicol, Generación, Despacho de crudo, Sistema eléctrico, Contraincendios y Deshidratación producen el 80% de las ordenes de mantenimiento correctivo, sobre estos sistemas se debería concentrar los esfuerzos en la búsqueda de oportunidades de mejora, especialmente en el sistema de Reinyección ya que este cuenta con el 35% de las órdenes de mantenimiento correctivas y glicol con el 11%. Como son cerca de 140 equipos los que pertenecen a los sistemas seleccionados, se realiza un primer Pareto en el cual se seleccionan 31 equipos, correspondientes al 80% de las ordenes correctivas de los años objeto de estudio, seguido a esto se realiza un segundo Pareto con estos 33 equipos, con el fin de priorizar los equipos que deben ser tenidos en cuenta para el análisis (ver figura 14).

Figura 14. % Órdenes de trabajo de mantenimiento correctivo por equipos



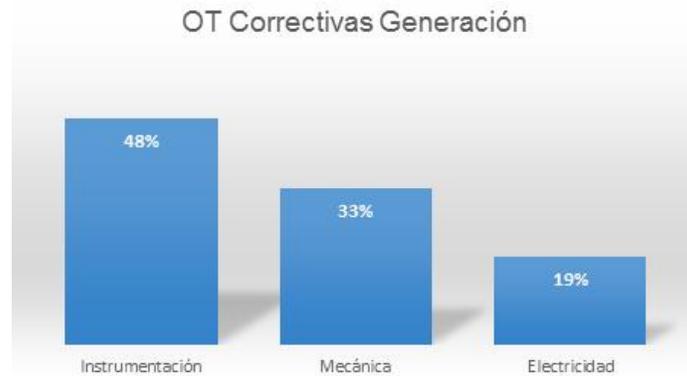
De la figura 14, se determina que el sistema de reinyección y el de generación son los sistemas con mayor cantidad de órdenes de mantenimiento correctivo, ya que proporcionan el 60% de estas. Los cuales son sistemas críticos para la producción de la planta. Estos equipos son los seleccionados para identificar los malos actores, sistemas y equipos que tienen una gran cantidad de paradas de emergencia y de mantenimientos correctivos, en los cuales se concentran los mayores costos, ya que se incrementa el uso de mano de obra y de repuestos.

3.2 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS IDENTIFICADOS

Figura 15. Órdenes de trabajo correctivo sistema de reinyección.

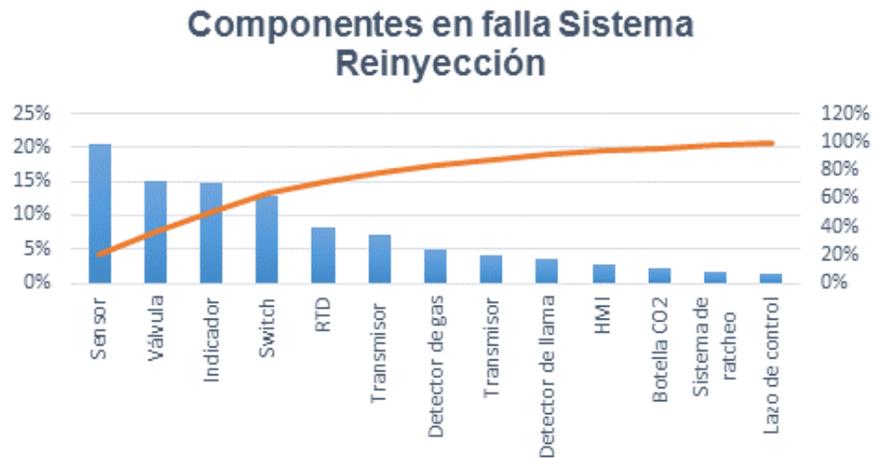


Figura 16. Ordenes de trabajo correctivo sistema de generación.



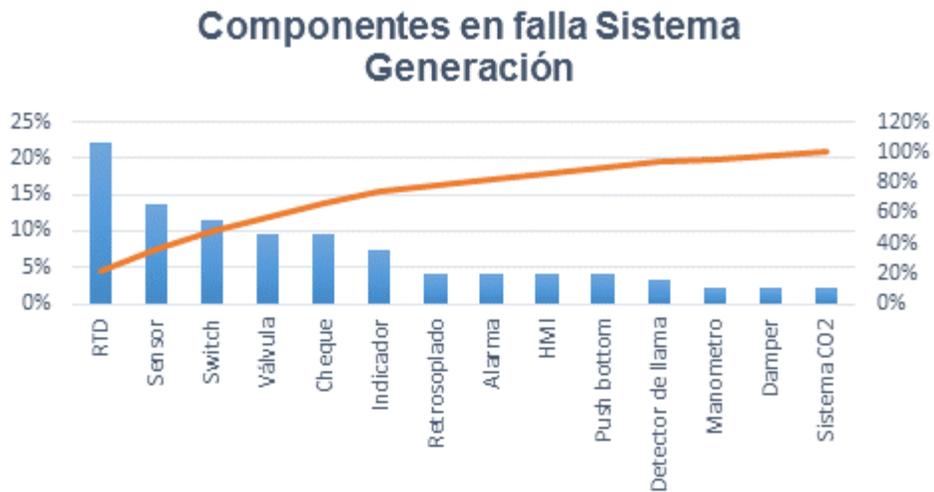
En las figuras 15 y 16, se puede observar que la disciplina de instrumentación en los sistemas de reinyección y generación fue para la que se generó la mayor cantidad de trabajo correctivo. A continuación se realizará un análisis para estos dos sistemas de la planta identificados como mal actor específicamente para el área de instrumentación. Se encontraron 650 órdenes de mantenimiento correctivo para el sistema de reinyección, por lo que se requiere disminuir el foco de estudio.

Figura 17. Componentes en falla Sistema Reinyección para la disciplina de instrumentación.



En la figura 17 se tiene los componentes que presentaron mayor cantidad de fallas para la disciplina de instrumentación en el sistema de reinyección.

Figura 18. Componentes en falla Sistema Generación para la disciplina de instrumentación.



En la figura 18, se muestran los componentes en el sistema de generación que el presentaron mayor número de mantenimientos correctivos.

Tabla 3. Comparación componentes sistema de Reinyección y sistema de generación.

Componente	Reinyección	Generación
Sensor	X	X
Válvula	X	X
Indicador	X	X
Switch	X	X
RTD	X	X
Transmisor	X	
Cheque		X
Retrosoplado		X

En la tabla 3 se observa el 20% de los componentes que produjeron el 80% de las órdenes de mantenimiento correctivo para los sistemas de reinyección y generación; además se muestra que los componentes guardan similitud en un 75%.

3.3 ANÁLISIS DE DATOS DE FALLA PARA LOS EQUIPOS MAL ACTOR

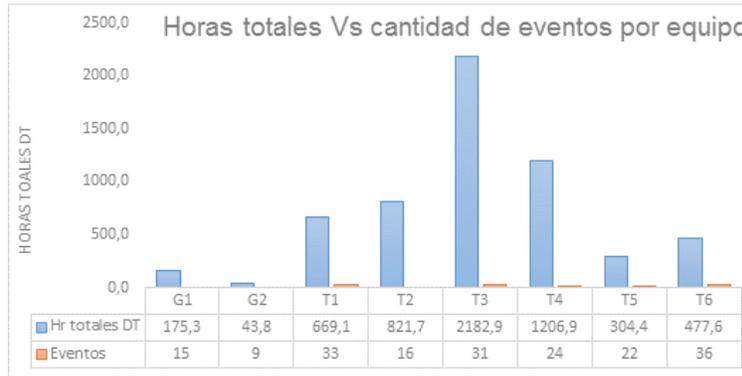
De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente, se ha identificado a los equipos de Reinyección y Generación como mal actor, los cuales serán usados en posteriores análisis debido a su importancia dentro del proceso de producción de la planta.

3.3.1 Turbo-generadores. La generación de energía es un sistema principal de apoyo, son los encargados de suministrar la demanda de energía de los equipos de la planta. Está conformado por un generador-turbina energizado con gas combustible, un generador eléctrico de 21 MW, accionado por una turbina a gas de un eje.

3.3.2 Compresor de gas de reinyección. Está compuesto por 3 equipos de media presión y 3 de alta presión, son turbinas de ciclo sencillo, de operación continua. Estas unidades están diseñadas para comprimir 430 millones de pies cúbicos de gas con una presión de descarga final de 6285 psig.

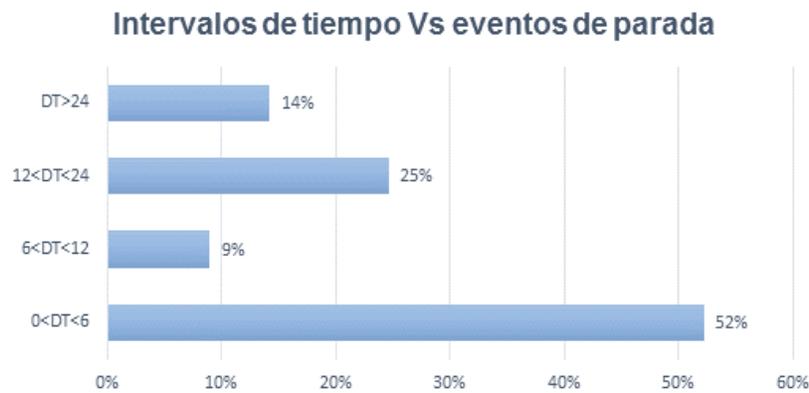
A continuación, se estudiará el comportamiento de las fallas de estos equipos durante el periodo comprendido entre el 01 de enero de 2011 a 31 de diciembre de 2015. En la figura 19 se observa el total de horas fuera de línea de los equipos y la cantidad de eventos para cada uno de estos. Se establece que el equipo T6 tiene la mayor cantidad de eventos, pero el equipo T3, junto con el equipo T4 son los que reporta el mayor tiempo de parada del equipo.

Figura 19. Horas totales Vs cantidad de eventos por equipo.



El tiempo fuera de servicio de los equipos (DT) se dividió en periodos de frecuencia, para lo cual se toma un periodo de corta duración el cual va de 0-6 h, duración intermedia de 6-12 h, duración mayor de 12-24 h y duración alta de 24 h en adelante.

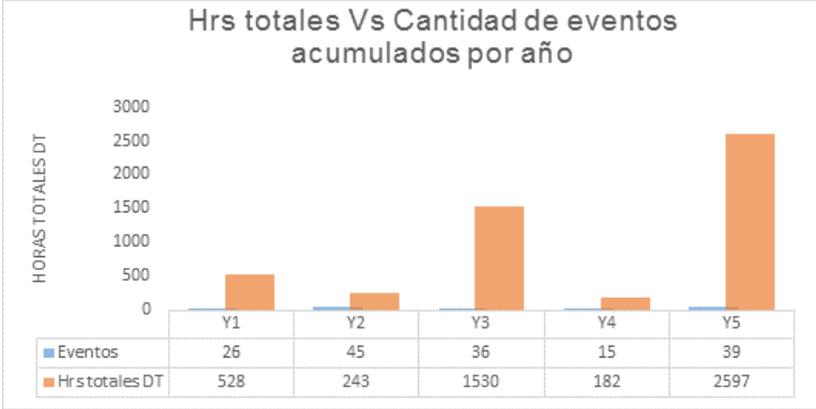
Figura 20. Intervalos de tiempo Vs eventos de parada.



En la figura 20 se puede observar el porcentaje de eventos de falla de los equipos estudiados, donde el 52% de las paradas de los equipos fue solucionado en el intervalo de 0-6 h., las actividades correctivas fueron realizadas en un periodo de tiempo no mayor a 6 h, lo que quiere decir que fueron eventos de falla de poca complejidad y la operatividad del equipo pudo ser restaurada en poco tiempo. El 9% tuvo una duración de parada de 6-12 horas, un tiempo entre 12-24 h. fue del 25% las cuales generalmente tienen una mediana complejidad y un 14% tuvo una

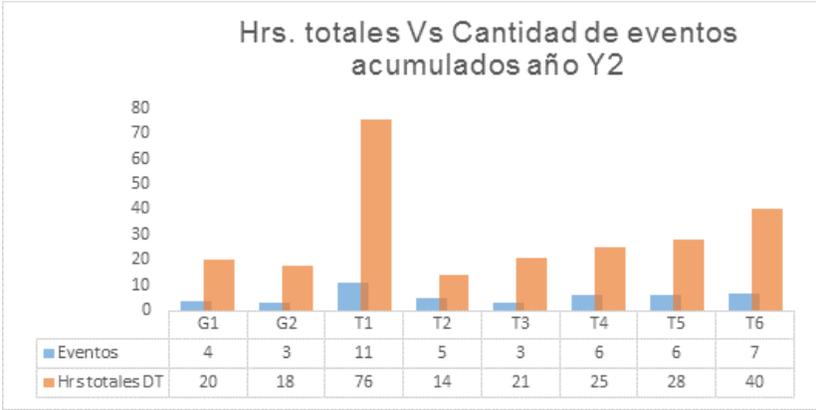
duración de más de 24 h., este 14% indica que fueron fallas que necesitaron intervenciones de mayor complejidad.

Figura 21. Horas totales Vs Cantidad de eventos acumulados por año.



En la figura 21, se puede observar que el año con el mayor número de eventos es el Y2, sin embargo la mayor cantidad de tiempo de parada de los equipos fue en el año Y5.

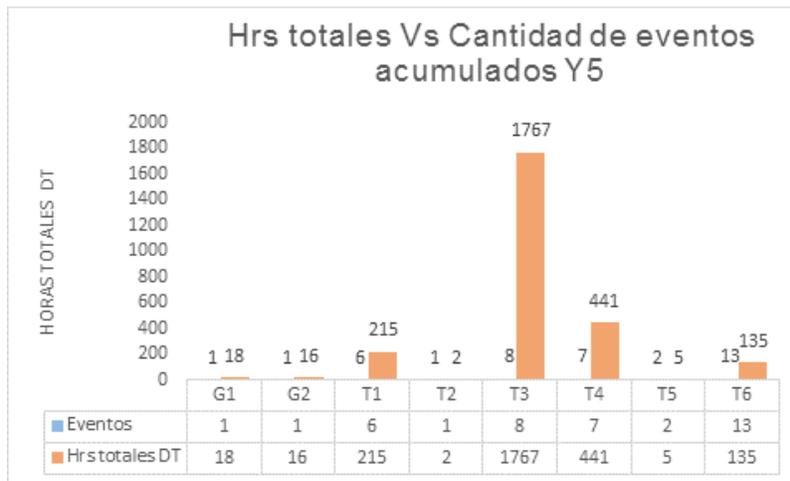
Figura 22. Horas totales Vs Cantidad de eventos acumulados año Y2



Cómo se aprecia en la figura 22, el equipo con mayor cantidad de eventos y mayor tiempo acumulado de Down Time es el T1, para este equipo se determinó que todos

los eventos se presentaron en el primer semestre del año y estos estuvieron relacionados con los sistemas de instrumentación y control (I&C) del equipo.

Figura 23. Horas totales Vs Cantidad de eventos acumulados Y5.



En la figura 23 se observa que el equipo con mayor cantidad de tiempo fuera de servicio es el T3. Se determina que esto se debe a una falla en su cojinete que implicó realizar un mantenimiento intrusivo y que demandó gran cantidad de recursos humanos y físicos.

3.4 COSTO DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El costo de eliminación de fallas refleja la información relacionada con el costo de mano de obra (HH) empleadas durante las diferentes actividades de mantenimiento para la recuperación de la función del equipo, así como el costo de materiales e insumos empleados en estas actividades.

$$\text{COEF} = \text{CM} + \text{CMO} / \text{CM} = \text{Consumo de materiales} / \text{CMO} = \text{Costo de mano de obra}$$

Figura 24. Costo anual mantenimiento.



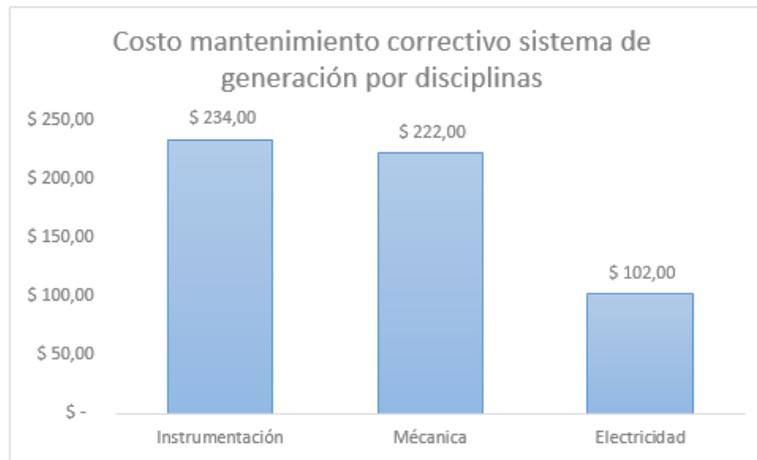
El costo total se obtiene a partir de las horas hombre utilizadas en las actividades de mantenimiento clasificadas como correctivas y el costo de los repuestos usados (ver figura 24).

3.4.1 Costo mantenimiento correctivo Turbo-generadores. De la figura 25 y 26 se concluye que la instrumentación de los equipos continúa siendo el mal actor, aunque la disciplina de mecánica se encuentra cerca del valor, las propuestas de mejora iniciales estarán dirigidas a la disciplina de instrumentación y luego de su implementación se podrá continuar con la disciplina de mecánica.

Figura 25. Costo mantenimiento correctivo sistema generación.



Figura 26. Costo mantenimiento correctivo sistema de generación.



3.4.2 Costo mantenimiento correctivo turbinas reinyección. Del análisis de la figura 27, se puede establecer que el mayor costo correctivo lo ha tenido la disciplina de mecánica para el sistema de reinyección.

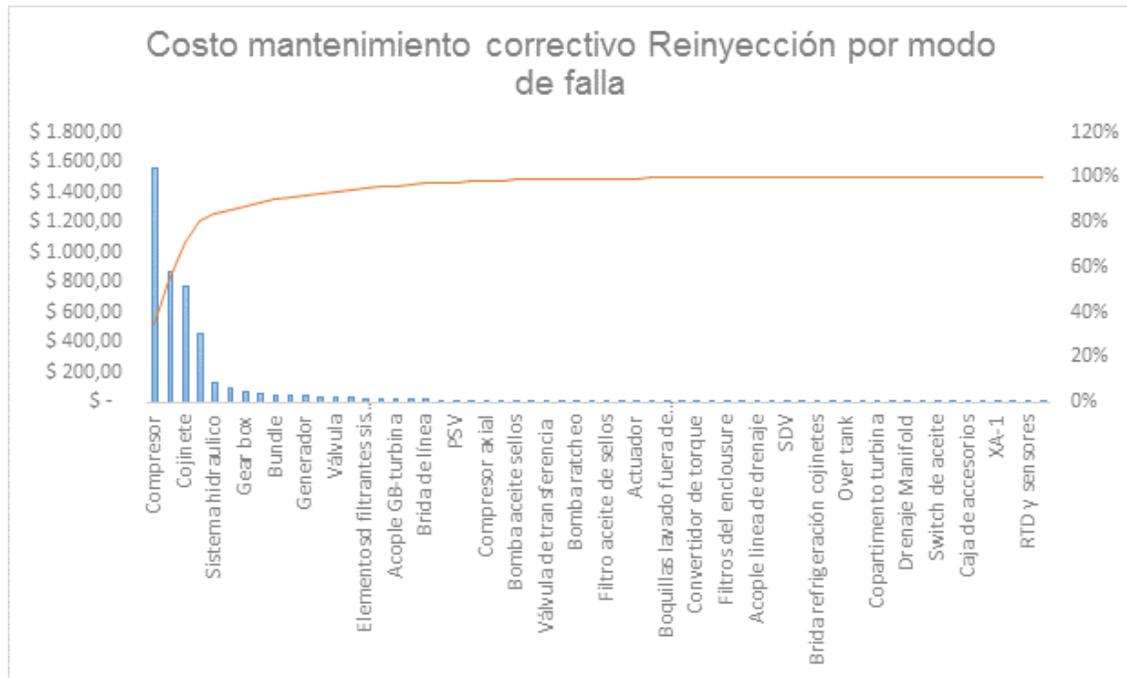
Figura 27. Costo mantenimiento correctivo sistema reinyección.



Figura 28. Costo mantenimiento correctivo sistema de reinyección por disciplinas.



Figura 29. Costo mantenimiento correctivo Reinyección por modo de falla.



En la figura 28 se determina que el compresor, la turbina, los cojinetes y los filtros de las casa de filtros son los modos de falla que más costos han originado en mantenimiento correctivo para el sistema de reinyección.

3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Al realizar el análisis estadístico de la información que se tiene de la planta durante los 5 años, se pudo determinar, cómo ha sido su comportamiento de la gestión del mantenimiento a través del tiempo.
- Se seleccionaron 2 sistemas de producción de la planta como malos actores resultado del análisis de la información, el sistema de generación y el sistema de Reinyección, estos representan una parte importante en la planta, una falla ocasiona un aumento en las pérdidas de producción y una gran quema de gas, las cuales son controladas según regulaciones estatales.
- A su vez se pudo determinar los equipos malos actores pertenecientes a estos 2 sistemas de producción estudiados y cuáles fueron los modos de falla causantes de esto.
- Las propuestas de mejora serán enfocadas a las disciplinas de instrumentación y mecánica, las cuales son las que originan los más altos costos de mantenimiento correctivo.

4. ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD (CMD)

Este capítulo tiene como propósito explicar los cálculos de los índices de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los sistemas de la planta elegidos como mal actor vistos en el capítulo anterior, con la información de la base de datos de mantenimiento y de averías de los equipos. El cálculo e interpretación de estos índices permitirá visualizar el comportamiento de los equipos y de los sistemas seleccionados, considerando los siguientes aspectos: frecuencia de falla, tiempo de reparación y tiempo de operación.

Este documento presenta los cálculos de la confiabilidad y mantenibilidad; estos serán realizados por medio del método de análisis de Weibull. Esta es una distribución continua y tripamétrica, es decir está definida por tres parámetros, que al ser versátil permite obtener un valor numérico de la confiabilidad $R(t)$ de los equipos y a la vez conocer su comportamiento a través del tiempo.

4.1 DATOS A ANALIZAR

La estimación de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), se realiza basada en los datos de fallas registrados y los respectivos históricos de cada uno de los equipos seleccionados. El periodo estudiado se encuentra entre enero de 2011 y diciembre de 2015. Los equipos seleccionados, fueron 2 turbogeneradores (sistema de generación), y 6 turbocompresores (sistema de reinyección).

Esta selección se realizó de acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo 2, donde se identificó a estos equipos como malos actores. El análisis de los datos se realiza como sistema y para cada uno de los equipos.

Como primer paso se organizan los datos que se tienen desde enero de 2011, hasta diciembre de 2015, los cuales fueron agrupados utilizando una misma escala de tiempo (horas), con el objetivo de evaluar de forma correcta y sistémica cada uno de los datos obtenidos.

En el segundo paso se realiza el cálculo de los tiempos de funcionamiento de cada uno de los equipos UT (Up Time), el tiempo de parada DT (Down time), el tiempo entre mantenimientos correctivos (TBMc), el tiempo entre mantenimientos preventivos (TBMp), el tiempo para reparar (TTR) y el tiempo de duración de los mantenimientos preventivos (Mp).

Como tercer paso se realiza la obtención de los parámetros Weibull de cada una de estas observaciones correspondientes, por medio del software Weibull ++ versión 6 (versión de prueba). Por último, se realizan los cálculos correspondientes para cada uno de los parámetros CMD)

4.2 CÁLCULO PARÁMETROS DE CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD (CMD)

Para el estudio y análisis de la confiabilidad, se usan distribuciones como la distribución *Weibull*, Normal, Exponencial y Log normal, estas son las importantes ya que proporcionan resultados más acertados para este tipo de cálculo.

4.2.1 Estimación de los parámetros de la Confiabilidad. Para el estudio y análisis de la Confiabilidad de este proyecto se usa la distribución Weibull, una de las ventajas del uso de la distribución *Weibull* es su versatilidad ya que puede cubrir propiedades de otras distribuciones, si sus parámetros Gamma, Beta y Eta, asumen ciertos valores puede tomarse como una aproximación a la distribución normal, exponencial, etc. como se observa en la tabla 4, también se acomoda en cualquiera de las zonas de la curva de la bañera, permitiendo obtener mejores ajustes que con otras distribuciones.

Tabla 4. Parámetro de forma Beta de *Weibull*

Valor (β)	Característica
$0 < \beta < 1$	Tasa de falla decreciente, mortalidad infantil
$\beta = 1$	Distribución exponencial, fallas aleatorias
$1 < \beta < 2$	Tasa de falla creciente, cóncava, fenómeno de fatiga
$\beta = 2$	Distribución de Rayleigh
$\beta > 2$	Tasa de falla creciente, convexa
$3 < \beta < 4$	Tasa de falla creciente se aproxima a la distribución Normal; simétrica, fenómenos de desgaste

Fuente: MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009.

La distribución *Weibull* de dos parámetros, es utilizada en los estudios de confiabilidad, presenta una gran flexibilidad para crear modelos de varios tipos de comportamiento de riesgo y puede describir varias situaciones reales. Donde Beta (β) es el parámetro de forma, el cual refleja la dispersión de los datos y determina la forma de la distribución y η el parámetro de escala o característica de vida útil, lo cual es importante para determinar la vida útil del sistema y es definida como la edad a la cual el 63,2% de las unidades podrían fallar; entonces, se determina como $\beta 63$ cuando $\beta = 1$, y entre mayor sea su valor mayor es la confiabilidad del componente o equipo.

En la distribución *Weibull* de tres parámetros, adicional a los dos parámetros anteriores esta Gamma (γ) el parámetro de localización, el cual indica el lapso donde la probabilidad falla en nula.

En cuanto a las inspecciones programadas el valor de β nos indica una característica (ver Tabla 5).

Tabla 5. Beta para inspecciones programadas

Valor (β)	Característica
$\beta < 1$	Las inspecciones programadas son de costo económico no efectivo
$\beta > 1$	Los programas de inspección son tomados desde el gráfico de Weibull, calculando la probabilidad aceptable de falla
Para modos de falla por desgaste	Si el costo de una falla sin planear es mayor que el costo de un reemplazo planeado, el intervalo del tiempo óptimo de mantenimiento o reemplazo es calculado a costo mínimo

Fuente: MURILLO, William. Confiabilidad y análisis estadístico para la predicción de fallas, seguridad, supervivencia, riesgo, costo y garantías de los equipos. [En línea]. Disponible < <https://goo.gl/j5xihL>>

4.2.2 Estimación de los parámetros de la mantenibilidad. Para estimar la mantenibilidad se puede realizar de dos formas, el estadístico y el método gráfico-analítico, los cuales brindan como salida las medidas de mantenibilidad. Esta tiene una connotación estadística relacionada con la probabilidad de que un equipo o sistema pueda volver a su estado normal de operación después de ser intervenido.²⁷

Las medidas con las cuales se puede describir la mantenibilidad están relacionadas con el tiempo en el cual se encuentra en reparación (TTR), en el caso de estudio se utilizará el mismo tiempo que el equipo estuvo fuera de servicio o Down time (DT), ya que es la información disponible.

²⁷ MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009

Para el análisis de la información se selecciona el método estadístico, realizando el análisis de la información histórica disponible de los eventos, tales como las intervenciones de mantenimiento en los equipos analizados.

4.2.3 Estimación de los parámetros de la disponibilidad. Para la estimación de los parámetros de disponibilidad, primero se elige la disponibilidad más adecuada para calcular de acuerdo a la información disponible. Los diferentes tipos de disponibilidad fueron vistos en el Capítulo 1 en la sección 2.4.2, para el desarrollo de este proyecto se realiza el cálculo de la disponibilidad alcanzada, ya que se cuenta con la información de los tiempos de mantenimientos planeados y tiempos de reparación correctiva de los equipos estudiados.

La Disponibilidad Alcanzada (D_A), es la probabilidad que el sistema opere satisfactoriamente, cuando se requiere en cualquier tiempo bajo las condiciones de operación normales y en un entorno ideal de soporte logístico, sin considerar ningún retraso logístico o administrativo²⁸

Para calcular los valores de D_A , se hace uso del método del cálculo puntual y el de la distribución Weibull.

Para el cálculo de la D_A se usará la ecuación (30):

$$\text{Disponibilidad Alcanzada} = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}} \quad (30)$$

Donde:

$MTBM$ = Tiempo medio entre mantenimientos

\bar{M} = Tiempo medio de mantenimiento

$MTBM_C$ = Tiempo medio entre mantenimientos correctivos

²⁸ MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009

$MTBM_p$ = Tiempo medio entre mantenimientos planeados

$MTTR$ = Tiempo neto medio para realizar la reparación

$$MTBM = \frac{1}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} \quad (31)$$

$$\bar{M} = \frac{\frac{MTTR}{MTBM_c} + \frac{M_p}{MTBM_p}}{\frac{1}{MTBM_c} + \frac{1}{MTBM_p}} \quad (32)$$

En la ecuación (30) se tiene la relación entre el tiempo medio entre mantenimientos (MTBM), donde se incluye tanto las reparaciones correctivas y preventivas y el tiempo medio de mantenimiento (\bar{M}) (correctivo y planeado). El MTBM es un indicador de la frecuencia de los mantenimientos ver ecuación (31), es función de la frecuencia de los mantenimientos planeados y no planeados. El tiempo medio de mantenimiento \bar{M} es el tiempo medio de mantenimiento activo que se necesita para efectuar una tarea de mantenimiento, ecuación (32), donde el MTTR es el tiempo neto medio para realizar las reparaciones o mantenimientos correctivos.

4.3 ANÁLISIS CMD SISTEMAS MAL ACTOR DE LA PLANTA

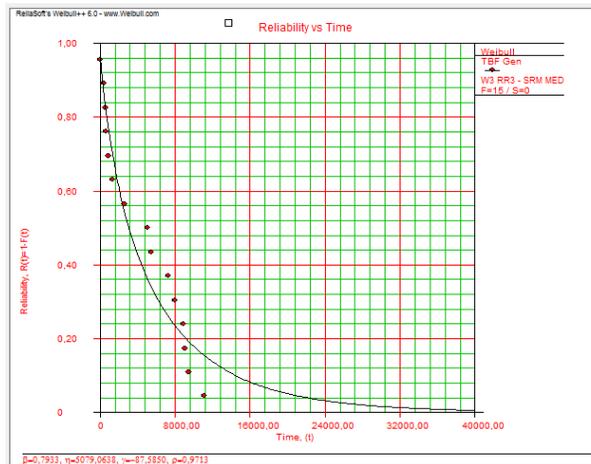
Se realizarán los respectivos análisis CMD para cada uno de los sistemas elegidos y sus equipos correspondientes, usando el histórico de falla de cada uno, estimando los respectivos parámetros de forma, según la distribución estadística que se ajuste.

4.3.1 Sistema de generación.

4.3.1.1 Confiabilidad. Para el análisis de la confiabilidad se estima por medio del software Weibull ++ versión 6 (versión de prueba) la distribución estadística que se ajusta a los históricos de falla del sistema de Generación.

Para esto se utilizan los tiempos entre fallas (TBF), el software determina que distribución se ajusta mejor, En el caso de los datos para el sistema de generación es una la distribución *Weibull* tipo 3.

Figura 30. Confiabilidad Vs tiempo para el sistema de generación.



En la figura 30 se observa la relación entre la confiabilidad y el tiempo de operación del sistema de generación, los parámetros dados por el programa son presentados en la tabla 6.

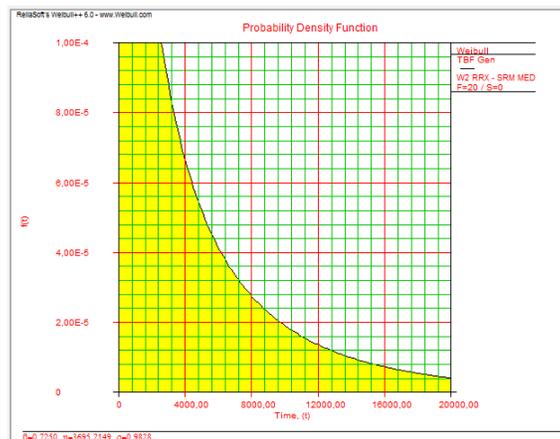
Tabla 6. Resultados análisis de confiabilidad sistema de generación.

Beta (β)	0.7933
Eta (η)	5079.06
Rho (ρ)	0,9713

Según los parámetros de forma obtenidos en la tabla 6, el valor de Beta es menor que 1 lo que quiere decir que el sistema de generación tiene una tasa de falla decreciente y que se encuentra ubicado en el área de mortalidad infantil (según la curva de la bañera), esta tasa de fallas puede deberse a problemas de manufactura, montajes inadecuados, problemas al hacer mantenimientos correctivos, calidad deficiente en el mantenimiento o los repuestos.

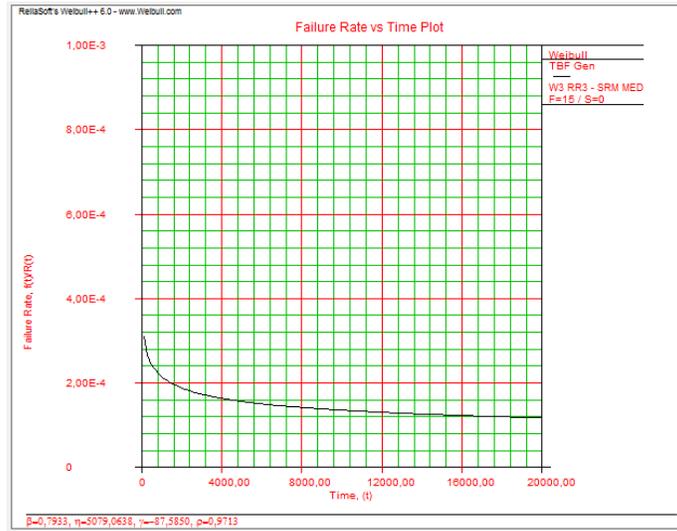
La probabilidad que falle el sistema antes de un tiempo de 720 horas es del 20,75%, es decir su confiabilidad a 720 horas de uso es del 79,25%.

Figura 31. Función de densidad de probabilidad de fallas sistema de generación.



En la figura 31 se observa que la mayoría de las fallas ocurren cerca de las 5000 horas, según el valor de Eta (η) que es de 5079,06 horas que indica la vida característica del sistema, donde η es definida como la edad a la cual el 63,2% de los equipos del sistema podrían fallar.

Figura 32. Función de tasa de falla del sistema de generación.



En esta figura 32, se puede observar la tasa de falla versus el tiempo en línea del sistema, la probabilidad de que el sistema de generación falle en determinado tiempo, por ejemplo a las 8000 horas, es del 76,46%.

En la figura 33, se presentan los valores de los parámetros para cada uno de los equipos pertenecientes al sistema de generación.

Tabla 7. Resultados parámetros de Confiabilidad del sistema de Generación.

Sistema/Equipo	Confiabilidad			Confiabilidad a 720 hrs
	β	η	MTBF	
Sis Generación	0,7933	5079.06	5790	79.25%
G1	0.7795	3912.20	1155	76.77%
G2	0.817	4422.05	4938	77.76%

La tabla 7 muestra que tanto el sistema como cada uno de los equipos se encuentran en una etapa de falla decreciente o mortalidad infantil, donde G1 tiene una vida característica de vida útil (η) de 3912,20 horas; siendo este el de menor valor, lo que indica que este equipo es el menos confiable, ya que presentó una mayor cantidad de fallas.

Estas fallas presentadas en el equipo se pueden controlar con estrategias como el análisis de causa raíz y de esta forma reducir las fallas del equipo.

4.3.1.2 Mantenibilidad. La mantenibilidad estudia el tiempo empleado en las actividades de mantenimiento necesarias para mantener un equipo en funcionamiento, el tiempo para recuperarlo luego de una falla.

Un sistema es mantenible cuando el esfuerzo asociado a su restauración es bajo, lo que indica que la probabilidad de que el sistema sea restituido a sus condiciones de operación normales, es alta.

Los tiempos de reparación o que tan mantenible es un sistema o equipo está relacionado con factores externos como el personal que ejecuta, las tareas de mantenimiento y su nivel de especialización, los procedimientos, recursos disponibles para la ejecución de la tarea como máquinas y equipos.

Tabla 8. Resultados análisis de mantenibilidad de generación

Beta (β)	0,4892
Eta (η)	5,4620
Gamma (γ)	0,6163
Rho (ρ)	0,9903

Para el sistema de generación se encuentra que su Beta es menor a 1 lo que indica que el sistema tiene baja mantenibilidad ya que los esfuerzos asociados a la restitución del sistema son altos, lo que quiere decir que su probabilidad es baja (ver tabla 8).

Para el cálculo de la mantenibilidad se emplean los tiempos de reparación o tiempos fuera de servicio del sistema de generación, a través de la distribución *Weibull* se obtienen los resultados mostrados en la figura 33 y 34.

Figura 33. Mantenibilidad Vs Tiempo sistema de generación.

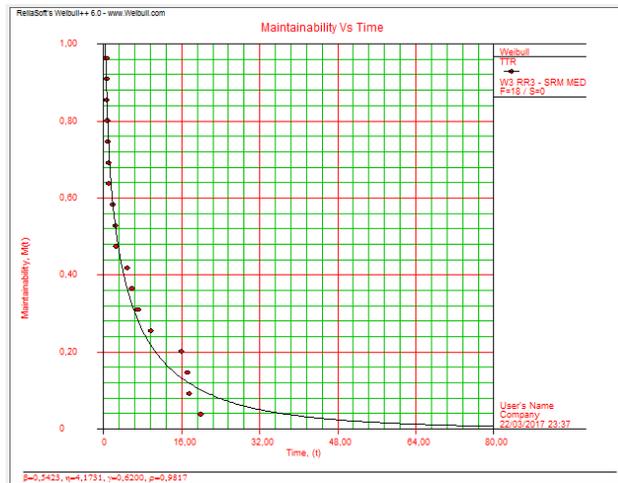
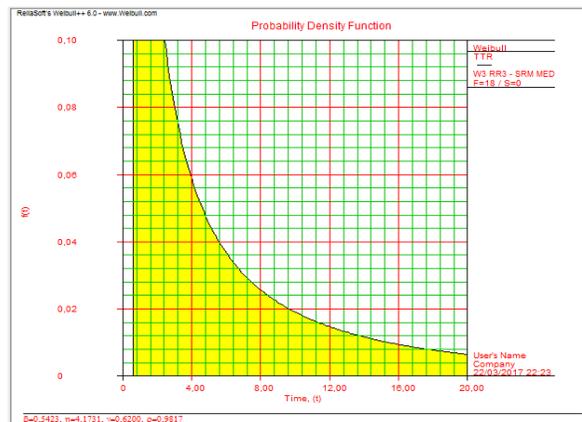


Figura 34. Función de densidad de probabilidad de mantenibilidad sistema de generación.



La probabilidad que el sistema sea restablecido en 1 hora es 76.13%

El parámetro que refleja la mantenibilidad de los equipos para las actividades correctivas es el tiempo medio para reparar MTTR, en la tabla 9 se puede observar estos valores para el sistema de generación, El G1 presenta la mayor cantidad de horas con un tiempo medio de reparación de 10,17 horas y se encuentra en la fase I de la curva de la bañera en el área de mortalidad infantil.

El equipo tiene baja mantenibilidad ya que los esfuerzos asociados a la restitución del sistema son altos, lo que indica que las fallas que se vienen presentando en el equipo se pueden controlar con estrategias como el análisis de causa raíz y de esta forma reducir el tiempo de la parada. Para el equipo G2 se observa que el valor de Beta es muy cercano a 1 lo que indica que se emplean intervalos de tiempo constantes en la atención de la falla.

Tabla 9. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de generación.

Sistema/Equipo	Tiempo medio de reparación			Tiempo medio de mantto (preventivo)		
	β	η	MTTR	β	η	Mp
	Sis Generación	0,4892	5,462	11,38	0,6431	48,1820
G1	0,4508	4,1187	10,17	0,5335	50,6439	10,77
G2	0,838	5,5232	6,063	0,6066	35,5565	11,77

Para el caso de la atención de los mantenimientos planeados (Mp) se puede observar en la tabla 9 que los equipos G1 y G2 tienen valores muy similares para su parámetro de forma Beta y su característica de vida útil Eta, los valores obtenidos nos indican que se emplean intervalos de tiempo o su tiempo de duración es de aproximadamente 11 horas.

Tabla 10. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de generación.

Sistema/Equipo	Tiempo medio entre manttos correctivos			Tiempo medio entre manttos preventivos		
	β	η	MTBMc	β	η	MTBMp
	Sis Generación	0,725	3615,21	4431	0,9991	5653,6905
G1	0,8098	4422,68	4968	0,7278	6181,7617	7551
G2	0,5615	8616,27	14217	1,0742	4804,9165	4674

En la tabla 10 se puede ver que el equipo G1 presenta un tiempo medio entre reparaciones correctivas (MTBMc) de 4968 hrs, con un Beta de 0,8098 cuyo valor es menor de 1 lo que indicaría que se encuentra en el área de la curva de mortalidad infantil.

Para el caso de los datos de mantenimiento planeado se puede observar que su Beta indica que se encuentra en una zona de mortalidad infantil, donde aproximadamente cada 7551 horas se realiza un mantenimiento programado, por lo que se tendría que revisar la estrategia de mantenimiento ya que la estrategia actual no alcanza a prevenir o predecir las fallas imprevistas.

4.3.1.3 Disponibilidad. Para el cálculo de la Disponibilidad alcanzada se usan las ecuaciones (30), (31) y (32) vistas en la sección 4.2.3.

Para el cálculo de mantenimiento planeado (M_p), se toman los tiempos de duración de los mantenimientos planeados según la estrategia de mantenimiento y los mantenimientos correctivos programados.

Según el análisis realizado del sistema de generación, en la tabla 11 se pudo determinar a partir del análisis del sistema y de cada uno de los equipos, con el fin de detectar cuál de los equipos presenta el menor rendimiento, para poder determinar las causas de esto, en lo que respecta a disponibilidad y tiempo medio entre fallas se detectó que el equipo G1 es el que tiende a comportarse de una manera menos favorable con 1155 hrs de tiempo medio entre fallas (MTBF), 98,62% de disponibilidad y con confiabilidad a 720 horas de uso del 76,77%.

Tabla 11. Calculo de disponibilidad.

	$MTTR$	M_p	$MTBM_p$	$MTBM_c$	$MTBM$	\bar{M}	A_o
Sis Generación	11,38	66,62	5656	4431	2484,5091	35,64	98,59%
G1	10,17	90,49	7551	4968	2996,502	42,04	98,62%
G2	6,063	52,75	4674	14217	3517,49	41,19	98,84%

4.3.2 Sistema de Reinyección.

4.3.2.1 Confiabilidad. Para el análisis de confiabilidad del sistema de reinyección, se estima por medio del software, la distribución estadística que se ajusta a sus históricos de falla, para lo cual se emplea el tiempo entre fallas del sistema (TBF). El programa determina que es una distribución *Weibull* tipo 3.

En la figura 35 se puede observar la relación entre la confiabilidad y el tiempo de operación del sistema de reinyección, en la tabla 12 se encuentran los parámetros *Weibull* dados por el programa.

Figura 35. Confiabilidad Vs Tiempo Reinyección

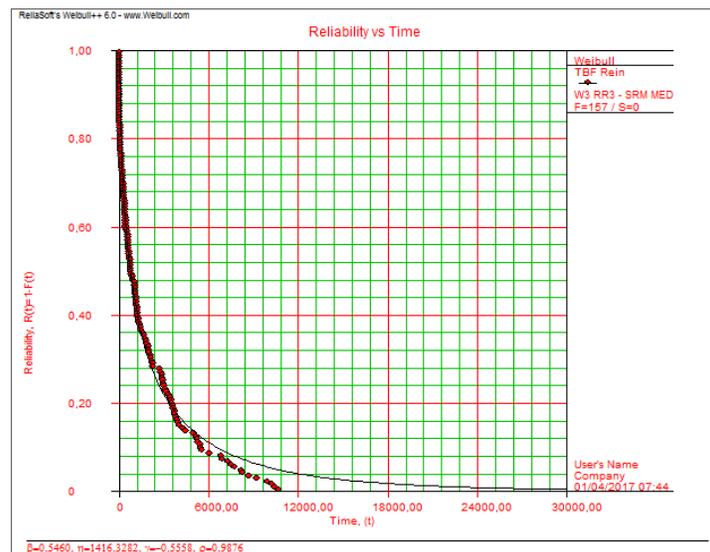


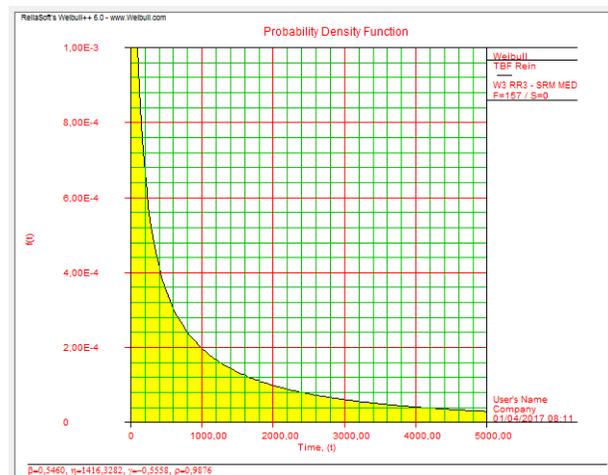
Tabla 12. Resultados análisis de confiabilidad reinyección

Beta (β)	0,5460
Eta (η)	1416,3282
Gamma (γ)	-0,5588
Rho (ρ)	0,9876

De acuerdo a los parámetros obtenidos se puede inferir que el sistema de reinyección se encuentra ubicado en la zona de mortalidad infantil según la curva de la bañera, y que los equipos tienen una vida característica de 1416,32 hrs.

Revisando la información de falla de los equipos se pudo determinar que esto se debía a problemas presentados durante el arranque luego de que el equipo presentara un falla que lo sacará de línea. El sistema tiene una confiabilidad del 50,09% para 720 h, lo que quiere decir que hay un 5,09% de probabilidad que el equipo funcione satisfactoriamente antes de que se produzca un fallo en 720 hrs, el valor de Rho es negativo lo que indica que el sistema tiene problemas en el arranque.

Figura 36. Función de densidad de probabilidad de fallas de reinyección.



La figura 36 refleja la función de densidad de probabilidad de fallas del equipo, para el sistema de reinyección, tiene una vida característica de 1416,32 hrs. Este es el tiempo en el que se espera que el sistema trabaje de manera satisfactoria, es la expectativa de tiempo hasta que se produzca un fallo en el 63,2% de los equipos.

En la tabla 13, se presentan los valores de los parámetros para cada uno de los equipos pertenecientes al sistema de reinyección, tanto el sistema como los equipos se encuentran ubicados en la primera fase de la curva de la bañera lo que implica mortalidad infantil y esto se puede ser originado por fallas en componentes eléctricos, errores de mantenimiento, etc.

Tabla 13. Resultados parámetros de confiabilidad del sistema de reinyección

Confiabilidad				
	β	η	MTBF	Confiabilidad a 720 hrs
Sis Reinyección	0,5460	1416,3282	2439	50,09%
T1	0,5929	2320,0008	3546	61,06%
T2	0,4524	1081,1504	2745	43,52%
T3	0,6064	1762,1581	2615	55,72%
T4	0,7973	1489,7588	2582	50,18%
T5	0,5160	873,6836	1651	40,47%
T6	0,8597	2353,5467	2543	67,38%

Según los valores de los parámetros de cada uno de los equipos, se puede inferir que el equipo T5 con un Beta de 0,5120, un Eta de 873,68 y un MTBF de 1651 h, es el equipo menos confiable, ya que presentó una mayor cantidad de fallas y tiene una vida característica menor a todos los otros equipos. Revisando la información de falla que se tiene del equipo T5 se determina que los TBF con menor cantidad de horas, en su mayoría se deben a fallas de control e instrumentación del equipo. También se puede determinar que el equipo T6 es el más confiable.

4.3.2.2 Mantenibilidad. Para determinar qué tan mantenible es el sistema de reinyección y los equipos que pertenecen a este, se estudia el tiempo empleado en las actividades de mantenimiento necesarias para su funcionamiento o recuperación luego de una falla, para su cálculo se emplean los tiempos de reparación de los equipos. El Software da una aproximación a la distribución *Weibull* tipo 2.

Tabla 14. Resultados análisis de mantenibilidad del sistema de reinyección.

Beta (β)	0,7633
Eta (η)	11,8074

Se puede observar la tabla 14 para el sistema de reinyección, donde el Beta (β) es de 0,7633, lo que indica que el sistema tiene una baja mantenibilidad, con esfuerzos de restitución altos. En la figura 37, se observa el comportamiento de la mantenibilidad a través del tiempo. El sistema de reinyección tiene probabilidad de restituir el sistema en 1 hora del 85,95% (ver figura 38).

Figura 37. Mantenibilidad Vs Tiempo del sistema de reinyección.

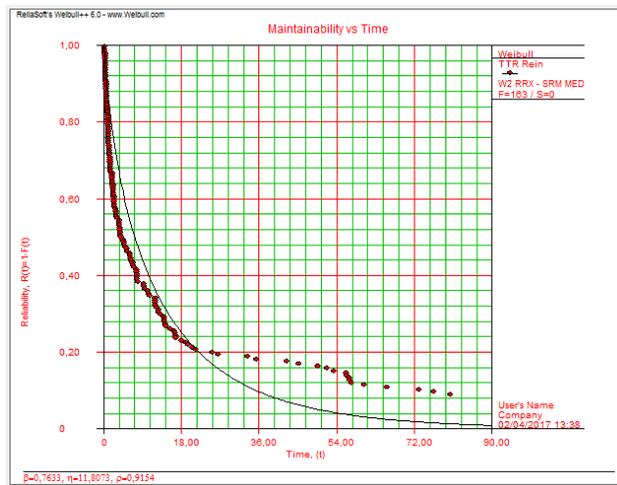
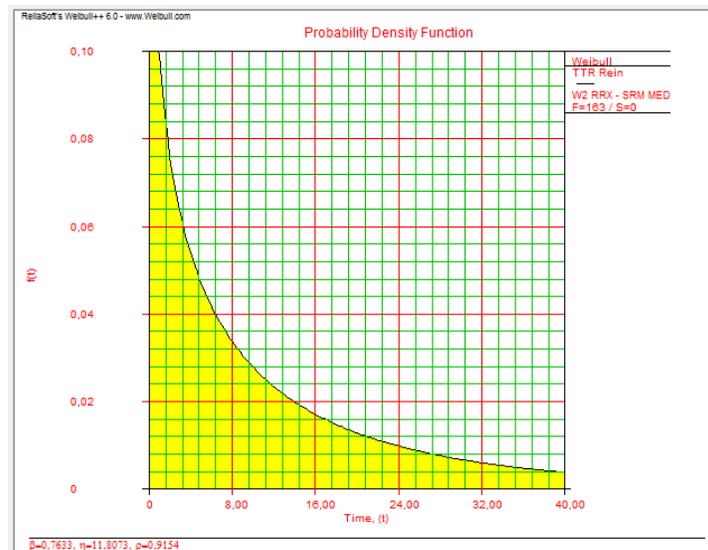


Figura 38. Función de densidad de probabilidad de mantenibilidad de Reinyección.



El MTTR que es el parámetro que refleja la mantenibilidad de los equipos para las actividades correctivas. En la tabla 15 se puede apreciar que los equipos con menor capacidad de mantenibilidad son T1 y T3 con 78,89 y 75,79 horas respectivamente para ser restaurados a su función.

Tabla 15. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de Reinyección.

	Tiempo medio de reparación			Tiempo medio de mantto preventivo		
	β	η	MTTR	β	η	MTTM
Sis Reinyección	0,7633	11,8073	13,85	0,7845	137,1027	157,6
T1	0,3705	18,9366	78,89	0,5898	119,5992	184,1
T2	0,5555	10,9248	18,32	0,5470	72,8228	125
T3	0,3993	22,6938	75,79	0,5130	146,7056	280,1
T4	0,4951	14,5577	29,65	0,5108	67,5204	129,9
T5	0,5876	7,2666	11,24	0,5644	69,2486	113,4
T6	0,6299	7,1061	10,06	0,5401	184,0227	322,3

Respecto al tiempo empleado en los mantenimientos planeados se observa que los equipos T3 y T6 tienen los tiempos medios de atención de los mantenimientos preventivos más altos, en este se tiene en cuenta los mantenimientos por estrategia y los mantenimientos correctivos programados. Revisando la información se puede inferir que esto se debe a que los equipos T3 y T6 tuvieron una mayor cantidad de mantenimientos por estrategia.

En la tabla 16 se revisan los datos correspondientes a los tiempo entre mantenimientos correctivos (MTBMc) y los tiempos entre mantenimientos preventivos (MTBMp). Se puede determinar que el equipo T5 tiene el menor tiempo medio entre reparaciones correctivas y el T6 del cual hay tres eventos preventivos los cuales son mantenimientos mayores.

Tabla 16. Resultados parámetros de mantenibilidad del sistema de reinyección.

	Tiempo medio entre manttos correctivos			Tiempo medio entre manttos preventivos		
	β	η	MTBMc	β	η	MTBMp
	Sis Reinyección	0,4663	1367,6880	3138	0,734	7240.35
T1	0,6438	2626,1196	3627	0,4850	3141,5616	70441
T2	0,4091	1103,0814	3450	0,4046	5847,4979	18836
T3	0,4196	1737,2411	5087	12,5088	45866,8	44041
T4	0,4676	1366,6041	3118	0,6151	6943,0181	10121
T5	0,4697	823,2207	1861	4,5427	15411	14071
T6	0,7398	2278,5432	2744	2,0672	8611,56	7628

Disponibilidad: para el cálculo de la Disponibilidad alcanzada se usaran las ecuaciones (30), (31) y (32) vistas en la sección 4.2.3

Tabla 17. Calculo de disponibilidad sistema de reinyección.

	MTTR	M_p	MTBM _p	MTBM _c	MTBM	\bar{M}	A_o
Sis Reinyección	13,85	157,6	8779	3138	2311,88	51,70	97,81%
T1	78,89	184,1	70441	3627	3449,18	84,04	97,62%
T2	18,32	125	18836	3450	2915,60	34,83	98,82%
T3	75,79	280,1	44041	5087	4560,21	96,95	97,92%
T4	29,65	129,9	10121	3118	2383,47	53,26	97,81%
T5	11,24	113,4	14071	1861	1643,31	23,17	98,61%
T6	10,06	203,2	3142	2744	2018,15	61,15	97,06%

A partir del análisis realizado al sistema de reinyección (ver tabla 17), se pudo determinar que el equipo que tiene un Tiempo medio entre fallas (MTBF) menor es el T5 con 2543 horas y con una confiabilidad a 720 horas de 40,47%, aunque su tiempo de medio de reparación (MTTR) es de 7,26 horas y su tiempo medio de mantenimiento que es de 69,24 hrs son bajos, lo cual se ve reflejado en una disponibilidad del equipo de un 98,61%, mientras que el T6 con la menor disponibilidad de 97,06% tiene la confiabilidad más alta de los equipos del sistema

de reinyección, pero tiene el tiempo medio de mantenimiento más alto con 322,3 horas, esto se debe a que tuvo cuatro mantenimientos mayores que son intrusivos y demandan gran cantidad de tiempo.

4.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- En el desarrollo de este capítulo se realizó un análisis, el cual permite a partir de la información histórica disponible, conocer el comportamiento de la gestión de mantenimiento en la planta. Se pudo determinar tres de los principales indicadores de mantenimiento clasificados como de clase mundial, como son el tiempo medio entre fallas, tiempo medio para la reparación y disponibilidad de equipos.
- La interpretación, uso y análisis de los parámetros y curvas características del análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), permite realizar una comparación entre los equipos del sistema de generación y el sistema de reinyección, equipos de características similares o afines permitiendo establecer el comportamiento de cada uno de estos, a través del tiempo.
- A partir del análisis CMD realizado se pudo determinar que equipos tuvieron un mayor impacto en lo que respecta al mantenimiento, eligiéndose como mal actor para el sistema de generación el equipo G1 y para el sistema de reinyección el equipo T5; Los cuáles serán estudiados en el siguiente capítulo de pronósticos.

5. PRONÓSTICO POR SERIES DE TIEMPO

A partir de los datos de los equipos seleccionados como malos actores en el capítulo anterior, se realiza el pronóstico de cuál sería el comportamiento futuro probable del parámetro a pronosticar. Los pronósticos son usados como herramienta para la toma de decisiones, ya que permite con un cierto grado de confianza contar con información adecuada y congruente para soportar el proceso decisivo.

En este capítulo se pretende evaluar el comportamiento a futuro de los sistemas elegidos como son el equipo G1 del sistema de generación y el equipo T5 del sistema de reinyección y a partir de este estudio dar las recomendaciones necesarias.

Para el desarrollo de este capítulo se utilizarán pronósticos de series temporales, las cuales dan un menor margen de error frente a la predicción realizada. El pronóstico basado en un análisis de serie de tiempos, recurre a las tendencias pasadas o presentes con el fin de proyectar los acontecimientos futuros. Los registros de fallas de años anteriores permitirían proyectar el patrón de fallas para el siguiente año.

Los valores que se obtiene de MTBMc, MTBMp, MTBM, MTTR, Mp y \bar{M} , permiten construir el futuro cercano que ocurre con el equipo analizado, se recomienda estimar hasta un 10% del tiempo evaluado y calculado, como máximo.²⁹

5.1 SELECCIÓN DE DATOS

Se realizará el análisis de las series de tiempo a los datos históricos correspondientes a 5 años, comprendidos entre enero de 2011 a Diciembre de 2015, con el objeto de observar si el patrón de comportamiento de la información en el pasado continuará en el futuro.

²⁹ MORA, Luis Alberto. Pronósticos de Demanda e Inventarios. COLDI. 2006

Estos datos se refieren a los equipos seleccionados como malos actores a través del desarrollo del documento, se efectúa la estimación de los pronósticos basado en los tiempos entre fallas TBF y los tiempos para reparar TTR de los equipos T5 y G1, realizando los cálculos en Microsoft Excel. Este tipo de análisis es valioso ya que estos equipos tienen frecuencias de falla relativamente altas.

5.2 PRONÓSTICO POR SERIE DE TIEMPOS EQUIPO T5 SISTEMA DE REINYECCIÓN

En esta etapa el objetivo es definir cuál es el comportamiento de los datos para identificar el modelo de pronóstico apropiado y aplicar el método de pronóstico respectivo.

5.2.1 Pronóstico TBF equipo T5 sistema de Reinyección

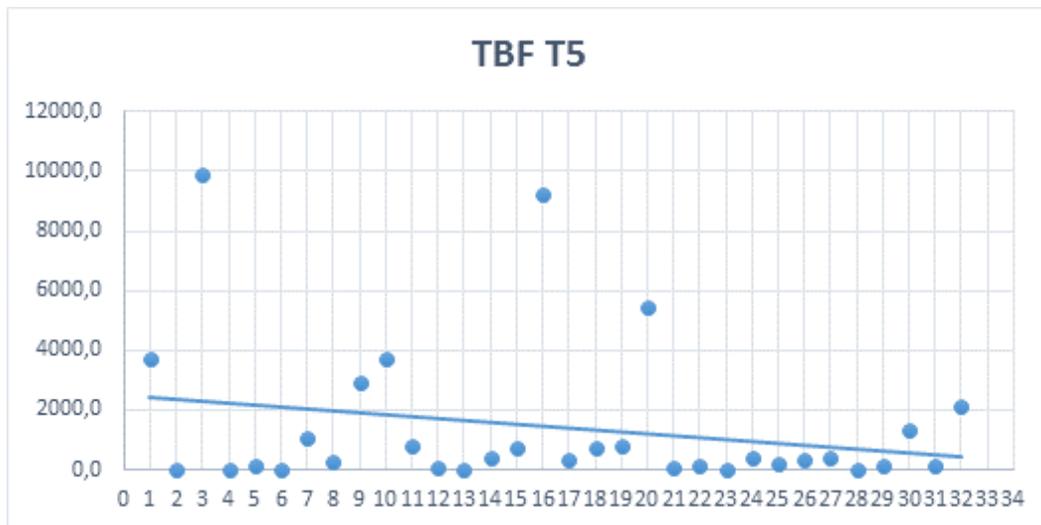
5.2.1.1 Identificación del modelo. En primer lugar, se crea un gráfico en Excel para observar los datos TBF del equipo T5 ver tabla 18, para el cual se cuenta con 32 datos.

Para la variable TBF del equipo T5 según la figura 39 se puede determinar que es un modelo con datos que presenta un patrón con tendencia decreciente, para este tipo de modelo las dos técnicas más utilizadas en el pronóstico, son la regresión lineal simple y la suavización exponencial doble usando el método de Holt.

Tabla 18.Datos TBF Equipo T5 sistema de reinyección.

Datos	TBF (Dt)	Datos	TBF (Dt)
1	3723.1	17	367.7
2	31.6	18	750.4
3	9905.5	19	808.7
4	7.2	20	5420.8
5	116.2	21	90.2
6	3.1	22	134.7
7	1048.9	23	33.5
8	247.3	24	388.9
9	2926.7	25	187.1
10	3718.0	26	343.7
11	804.0	27	406.9
12	46.1	28	28.6
13	1.2	29	157.6
14	429.9	30	1313.6
15	767.3	31	167.6
16	9205.8	32	2136.1

Figura 39.Gráfico de datos TBF T5 sistema de reinyección.



Como segunda forma para comprobar que la serie de datos tiene tendencia (creciente o decreciente) lineal o no lineal, es mediante la aplicación de un ajuste de tendencia lineal de modo $y = a + b \cdot t$, donde el valor de b , en primera instancia denota, si es o no diferente de cero 0 o sea tendencia neutral (horizontal) lo cual implicaría una tendencia con $b = 0 \pm 0,25$.³⁰ Al estimar los valores de la pendiente mediante Excel, da una pendiente negativa de -62,94 (ver figura 40), que es superior al rango descrito de $0.0 \pm 0,25$, lo que afirma que los datos si tienen tendencia.

Figura 40. Análisis de regresión de los datos TBF T5.

<i>Estadísticas de la regresión</i>		
Coefficiente de correlación múltiple		0,236050213
Coefficiente de determinación R ²		0,055719703
R ² ajustado		0,024243693
Error típico		2470,931343
Observaciones		32

ANÁLISIS DE VARIANZA		
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>
Regresión	1	10808127,96
Residuos	30	183165051,1
Total	31	193973179

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>
Intercepción	2467,254704	894,4921188
Variable X 1	-62,94381415	47,30842562

Con el fin de asegurar la selección adecuada del modelo de pronóstico se realizan los cálculos con los cuatro métodos: promedios móviles simple, suavización exponencial simple, regresión lineal simple y suavización exponencial doble, en la tabla 19, se muestran los resultados de la medición del error para cada uno de los métodos, para con esta información elegir el método más apropiado para la serie de datos. Utilizando el criterio que el error que sea más cercano a 0 es el que suministra el mejor resultado del pronóstico.

El método que presenta los errores más cercanos a cero 0, es el método de regresión lineal (RL), lo que indica que es una serie basada en tendencia.

³⁰ MORA, Luis Alberto. Pronósticos de Demanda e Inventarios. COLDI. 2006

Tabla 19. Errores Calculados para los datos TBF del equipo T5.

	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
Error	PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2	RL	SED
ME	265,57	292,48	132,18	79,74	0,00	-31,58
MAD	1849,90	1906,32	1852,07	1887,16	1639,22	1814,72
MSE	7726432,46	7107439,05	6510333,48	6987673,91	5723907,85	7251629,65
MAPE	41,76	110,16	79,08	80,11	80,91	74,69
σ_e	2312,38	2382,90	2315,09	2358,95	2049,03	2268,40

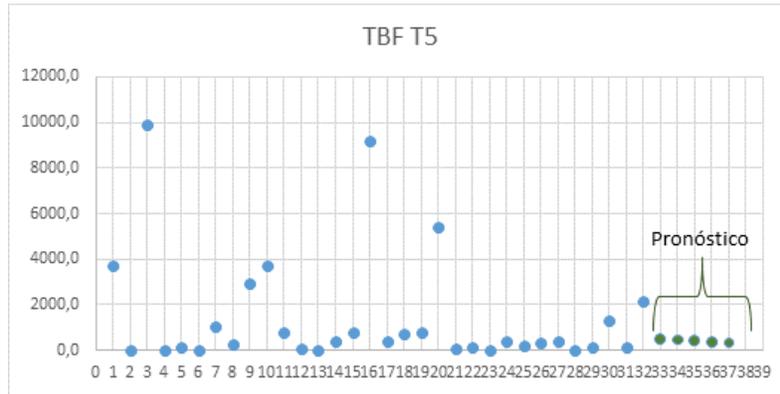
5.2.1.2 Pronóstico TBF Equipo T5. La tabla 20 muestra los valores resultados del pronóstico realizado por el método de regresión lineal (RL).

Tabla 20. Resultado pronóstico TBF equipo T5 del sistema de reinyección por el método RL.

Dato	Pronóstico
33	390,11
34	327,17
35	264,22
36	201,28
37	138,33

En la figura 41 se observan los datos históricos y el pronóstico para los próximos 5 periodos.

Figura 41. Gráfico de datos TBF T5 con pronóstico.

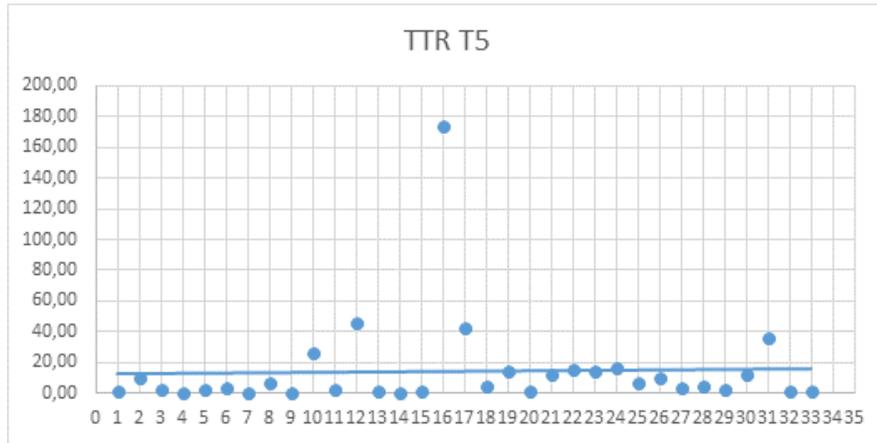


5.2.2 Pronóstico TTR equipo T5 sistema de Reinyección. Se elabora el gráfico de los datos TTR en Excel (ver tabla 21), para al cual se cuenta con 33 datos.

Tabla 21. Datos TTR Equipo T5.

Datos	TTR (Dt)	Datos	TTR (Dt)
1	1,55	18	4,72
2	10,22	19	14,33
3	2,00	20	1,17
4	0,45	21	12,33
5	2,55	22	15,50
6	2,88	23	14,50
7	0,40	24	16,67
8	6,93	25	6,25
9	0,57	26	9,62
10	26,67	27	3,05
11	2,05	28	4,00
12	45,23	29	2,42
13	0,88	30	12,00
14	0,45	31	35,42
15	1,02	32	1,47
16	173,45	33	1,40
17	42,50		

Figura 42. Gráfico de datos TTR T5.



La figura 42, representa los valores de la variable TTR, se puede observar que los datos presentan un patrón o estructura horizontal cuando la serie es neutra (o tiende a 0) y al estimar los valores de la pendiente mediante Excel, da una pendiente de 0,11 ver figura 43 que es inferior al rango descrito de $0.0 \pm 0,25$. A partir de esta información se puede decir que la serie es estacionaria. Aunque su desviación estándar es de 30,88, una desviación estándar alta, lo que permite afirmar que los pronósticos que se calculen a partir de la historia de esta serie tiene influencia de ruido o estructura horizontal que existe en ella. Para continuar con el ejercicio del pronóstico de la variable TTR se decide eliminar el dato 16 ya que 173,45 horas representa un dato atípico para la serie.

Figura 43. Análisis de regresión datos TTR equipo T5

Resumen		
<i>Estadísticas de la regresión</i>		
Coefficiente de correla	0,036847556	
Coefficiente de determ	0,001357742	
R ² ajustado	-0,030856524	
Error típico	31,43618617	
Observaciones	33	
ANÁLISIS DE VARIANZA		
<i>Grados de libertad/cuadrado</i>		
Regresión	1	41,65132585
Residuos	31	30635,24783
Total	32	30676,89916
<i>Coefficientes</i>		
<i>Error típico</i>		
Intercepción	12,37705177	11,19825344
Variable X 1	0,117986854	0,574710402

La figura 44 representa el gráfico de los datos de la variable TTR sin el dato atípico, de este se puede determinar que la serie presenta un crecimiento en su pendiente a través del tiempo y que posee una estructura tendencial.

Figura 44. Nuevo gráfico de datos TTR equipo T5 sin dato atípico.

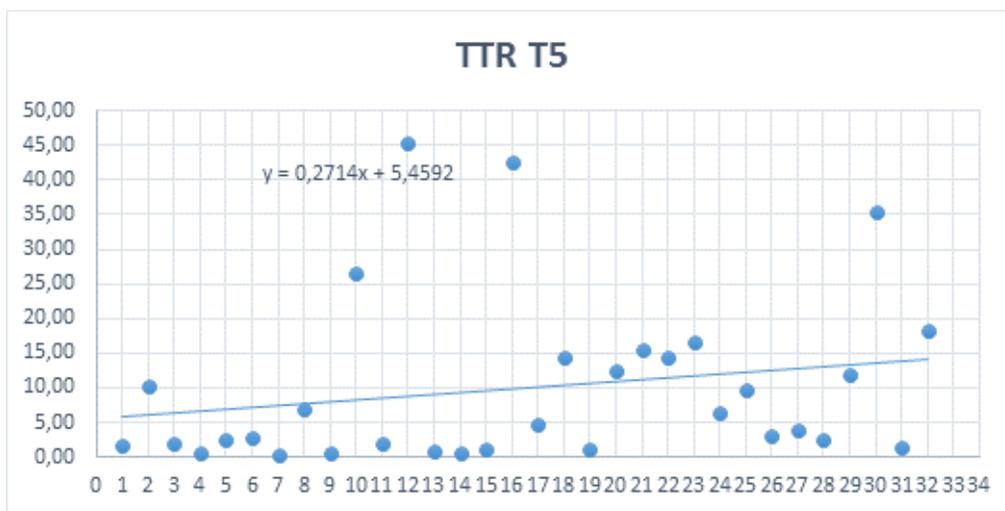


Figura 45. Análisis de Regresión datos TTR equipo T5 sin dato atípico

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,209281008
Coefficiente de determinación R ²	0,043798541
R ² ajustado	0,011925159
Error típico	12,09326169
Observaciones	32

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>		<i>Suma de cuadrados</i>	
Regresión	1	200,9640586		
Residuos	30	4387,40935		
Total	31	4588,373409		

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>
Intercepción	5,459204889	4,377834011
Variable X 1	0,27141698	0,231537462

Su pendiente es de 0,27, la cual es diferente de cero ($0,0 \pm 0,25$), (ver figura 44), estableciendo una serie con estructura tendencial creciente.

En la tabla 22 se presentan los errores calculados para los cuatro métodos usados en el pronóstico y de esta forma determinar el método de cálculo más apropiado para la serie de datos.

Tabla 22. Errores calculados para los datos TTR del equipo T5.

Error	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
	PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2	RL	SED
ME	-0,41	-0,75	-0,51	-0,42	0,00	0,15
MAD	10,38	10,75	8,94	9,19	8,48	9,43
MSE	224,15	229,46	154,44	165,28	137,11	173,06
MAPE	4,85	4,87	4,07	4,10	3,93	4,31
σ_e	12,98	13,43	11,17	11,48	10,60	11,78

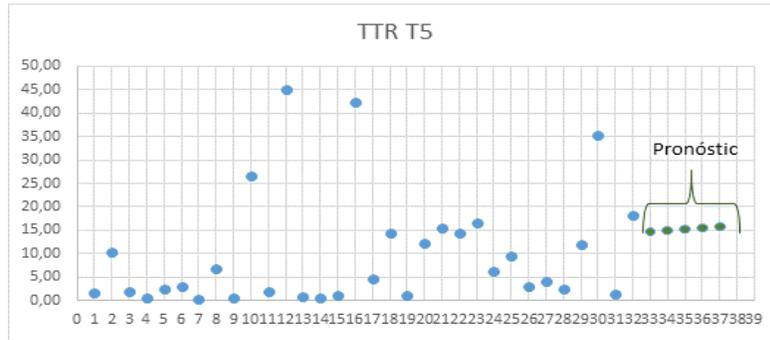
El método que presenta los errores más cercanos a cero 0, es el método de regresión lineal (RL), lo que nos confirmaría que es una serie basada en tendencia.

5.2.2.1 Pronóstico TTR Equipo T5. La tabla 23 muestra el resultado del pronóstico realizado por el método de regresión lineal (RL) y en la figura 46 se observa la gráfica con los datos históricos y el pronóstico para los próximos 5 periodos.

Tabla 23. Resultado pronóstico por el método RL.

Periodo pronosticado	Pronóstico
33	14,69
34	14,96
35	15,23
36	15,50
37	15,77

Figura 46. Gráfico de datos TTR con pronóstico.



5.3 PRONÓSTICO POR SERIE DE TIEMPOS EQUIPO G1 SISTEMA DE GENERACIÓN

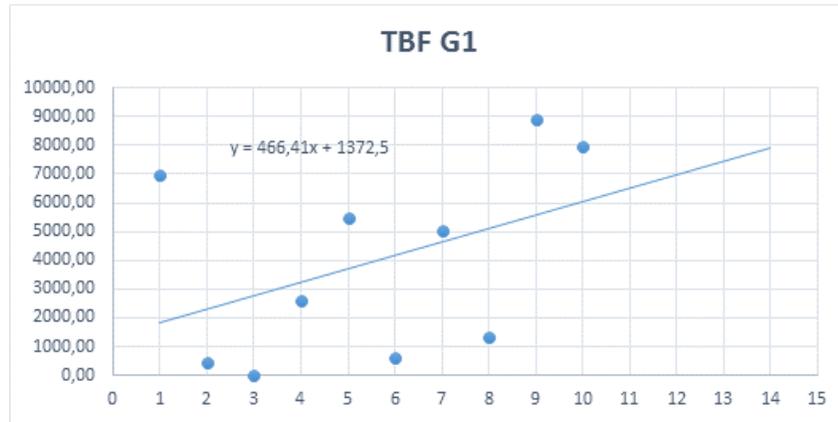
5.3.1 Pronóstico TBF equipo G1 sistema de Generación.

5.3.1.1 Identificación del modelo. Se elabora gráfico en Excel para ver comportamiento de los datos. Para el análisis se tiene 10 datos de TBF del equipo G1 (ver tabla 24). Esta cantidad de datos es pequeña para realizar un análisis de pronóstico de más de un dato.

Tabla 24. Datos TBF Equipo G1.

Datos	TBF (Dt)
1	6981,72
2	453,50
3	17,75
4	2590,60
5	5480,13
6	614,12
7	5061,80
8	1332,07
9	8884,10
10	7962,23

Figura 47. Gráfico de datos TBF G1.



Los datos según el gráfico de la figura 47 tienen un patrón de crecimiento lineal, aunque presenta un alto grado de variabilidad, su desviación estándar es de 3345,45 indicándonos la presencia de ruido. Al estimar los valores de la pendiente mediante Excel, da una pendiente de 466,41 que es superior al rango descrito de $0,0 \pm 0,25$, lo que confirma que los datos si tienen tendencia. (Ver figura 48).

Figura 48. Análisis de regresión de los datos TBF equipo G1.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correl	0,42210553
Coefficiente de detern	0,178173079
R ² ajustado	0,075444713
Error típico	3216,777654
Observaciones	10

ANÁLISIS DE VARIANZA		
	Grados de libertad	Suma de cuadrados
Regresión	1	17947079,79
Residuos	8	82781267,78
Total	9	100728347,6

	Coefficientes	Error típico
Intercepción	1372,534444	2197,477483
Variable X 1	466,4122222	354,1555637

Se realiza el cálculo del pronóstico por los métodos anteriormente mencionados, en la tabla 25 se encuentran los resultados de la medición del error para cada uno de estos.

Tabla 25. Errores calculados para los datos TBF del equipo G1.

	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
Error	PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2	RL	SED
ME	-1057,49	-1668,81	-300,34	-446,32	0,00	-376,64
MAD	3214,24	2945,57	3030,71	3065,60	2516,42	2419,59
MSE	11899387,56	12248119,14	10890467,82	11389841,59	8278126,78	7195428,73
MAPE	27,28	1,08	23,41	22,86	16,99	13,74
σ_e	4017,80	3681,96	3788,38	3832,00	3145,53	3024,49

Tabla 26. Resultado menor error.

Error	PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2	RL	SED
ME					X	
MAD						X
MSE		X				X
MAPE						
σ_e						X

La tabla 26 resume el resultado del error para cada uno de los métodos, para determinar cuál de estos es el modelo de pronóstico más adecuado para los datos. El método que presenta los errores más cercanos a cero 0, es el método de suavización exponencial doble (SED), lo que indica que es una serie basada en tendencia.

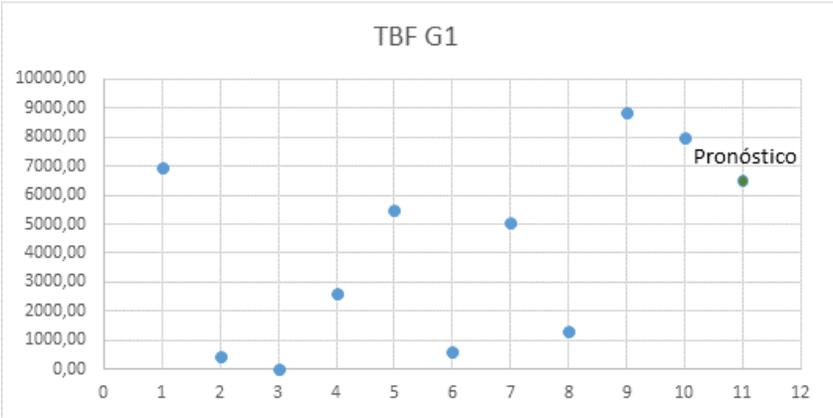
5.3.1.2 Pronóstico TBF Equipo G1. Debido a la poca cantidad de datos con que se cuenta para el análisis lo recomendable es pronosticar un solo dato y a medida que transcurra el tiempo y se tengan más datos realizar el pronóstico de nuevo.

Tabla 27. Resultado pronóstico por el método SED.

Periodo pronosticado	Pronóstico
11	6493,54

La tabla 27 muestra los valores resultado del pronóstico realizado por el método de suavización exponencial doble (SED), con un $\alpha = 0,2$ y $\beta = 0,1$ y en la figura 49 se aprecian los datos históricos y el pronóstico para un periodo.

Figura 49. Gráfico de datos TBF equipo G1 con pronóstico.

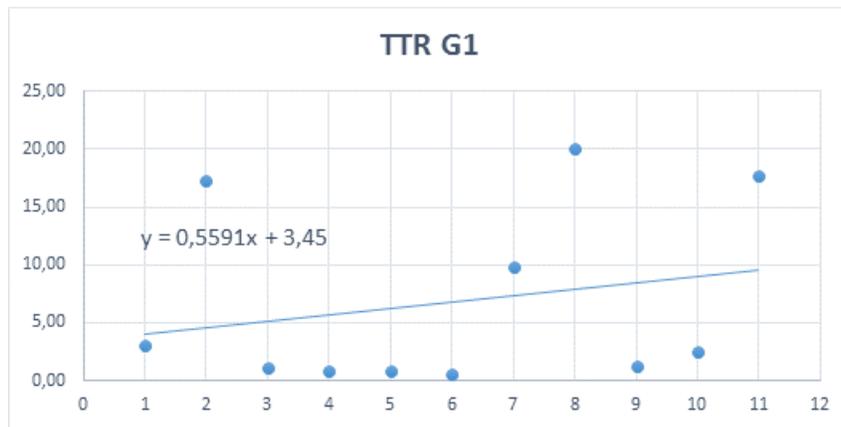


5.3.2 Pronóstico TTR equipo G1 sistema de Generación.

Tabla 28. Datos TTR Equipo G1.

Datos	TBF (Dt)
1	3,12
2	17,28
3	1,07
4	0,78
5	0,80
6	0,63
7	9,78
8	20,00
9	1,20
10	2,52
11	17,67

Figura 50. Gráfico de datos TTR G1.



La representación gráfica de la tabla 28 con 11 datos, se puede observar en la figura 50, donde se presenta una serie de datos con tendencia creciente, con una pendiente de 0,55 que es superior al rango descrito de $0,0 \pm 0,25$ (ver figura 51).

Figura 51. Análisis de regresión de los datos TTR del equipo G1.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correl	0,235972316
Coefficiente de determ	0,055682934
R ² ajustado	-0,049241184
Error típico	8,04924936
Observaciones	11

ANÁLISIS DE VARIANZA		
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i> :
Regresión	1	34,38409091
Residuos	9	583,1137374
Total	10	617,4978283

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>
Intercepción	3,45	5,205206399
Variable X 1	0,559090909	0,767465814

Con el fin de asegurar la selección adecuada del modelo de pronóstico se realizan los cálculos con los cuatro métodos: promedios móviles simple, suavización exponencial simple, regresión lineal simple y suavización exponencial doble. En la tabla 29 se muestran los resultados de la medición del error para cada uno de los métodos, para con esta información elegir el método más apropiado para la serie de datos.

Tabla 29. Errores calculados para los datos TTR del equipo G1.

Error	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
	PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2	RL	SED
ME	-0,01	-0,76	-0,42	-0,96	0,00	-0,36
MAD	8,81	8,00	7,09	7,22	6,41	7,92
MSE	106,40	81,78	61,49	66,39	53,01	72,58
MAPE	4,10	3,54	3,53	3,28	3,42	4,07
σ_e	11,01	10,00	8,86	9,02	8,02	9,91

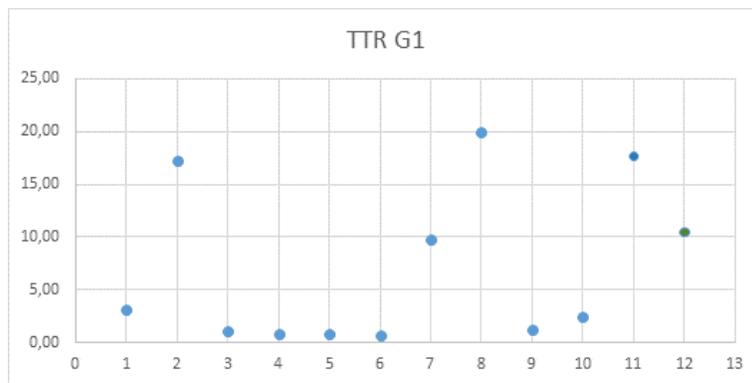
El método que presenta los errores más cercanos a cero 0, es el método de regresión lineal (RL), lo que nos indicaría que es una serie basada en tendencia.

5.3.2.1 Pronóstico TTR Equipo G1. Como en el caso de los datos TBF del G1, se cuenta con pocos datos para el cálculo del pronóstico de TTR del G1, por lo que es recomendable realizar el pronóstico para un solo periodo de tiempo. El dato pronosticado se muestra en la tabla 30 y su representación gráfica en la figura 52.

Tabla 30. Resultado pronóstico por el método RL.

Periodo pronosticado	Pronóstico
11	10,48

Figura 52. Gráfico de datos TTR equipo G1 con pronóstico.



5.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Los pronósticos realizados en este capítulo para los equipos T5 y G1 deben ser usados como una herramienta para la gestión del mantenimiento, pero teniendo en cuenta que son proyecciones futuristas de sucesos que pueden ocurrir, para planear estratégicamente las acciones a efectuar en el presente para estar preparados a enfrentar las amenazas futuras y de esta forma aprovecharlos.

- Los pronósticos son herramientas de fácil aplicación dentro de una organización que arroja suficiente información para la toma de decisiones adecuadas para la estructuración de estrategias acertadas enfocadas en los requerimientos operacionales y de mantenimientos de los equipos de la planta.
- Es recomendable realizar nuevos cálculos cada vez que ocurra un nuevo evento o cada vez que se incremente el tiempo estudiado en un 10%, aunque depende de las necesidades en particular de cada equipo o sistema que se quiera pronosticar.
- El conocer el pronóstico de estos parámetros como son el tiempo entre fallas (TBF) y el tiempo para reparar (TTR), permitirá realizar los ajustes correspondientes a la programación y también el estar preparados con los recursos físicos y humanos para atender o adelantarse a la ocurrencia del evento de falla del equipo.

6. ACCIONES DE MEJORA

Este capítulo trata de la identificación de oportunidades de mejora para los problemas principales identificados, empleando la metodología DMAIC. A través de la realización del proyecto se identificaron y priorizaron problemas de la planta, por medio de los pasos de la metodología DMAIC se busca proponer de una forma estructurada una guía de acciones de mejora con el fin de dar solución a estos, de tal forma que estas propuestas permitan a la dirección tomar decisiones y lograr la satisfacción de los clientes internos y externos, así como la mejora de proceso productivo, permitiendo la reducción de incidentes, fallas, defectos que lo afectan y el mejoramiento de sus parámetros de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

6.1 IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS U OPORTUNIDADES DE MEJORA

- Los sistemas con mayor cantidad de órdenes de trabajo correctivo son, con el 35% reinyección, 11% glicol y generación con el 8%, para un total del 54% en estos tres sistemas.
- Los equipos con mayor cantidad de órdenes de trabajo correctivo son, el T3, T5, T6, T2, T4, T1, todos pertenecen al sistema de reinyección, junto con el G1 y G2 los cuales pertenecen al sistema de generación.
- Los sistemas seleccionados como malos actores fueron el sistema de reinyección y generación con el 60% de las órdenes de trabajo correctivo.
- La disciplina con mayor cantidad de órdenes de trabajo correctivo, identificada tanto para el sistema de reinyección como el de generación, fue instrumentación.

- Se identificaron los componentes de instrumentación y control que más fallan tanto para el sistema de reinyección y el de generación respectivamente.

- A partir del análisis de costos de los mantenimientos correctivos del sistema de reinyección se pudo determinar que la disciplina de mecánica con cuatro modos de falla específicos fueron los que ocasionaron la mayor cantidad de costos de mantenimiento.

- Del análisis de los eventos de falla de los equipos pertenecientes al sistema de reinyección y generación, se pudo concluir que durante los años Y3 y Y5 se presentó la mayor cantidad de tiempo fuera de servicio de los equipos por falla (DT). Pero que en un 52% de las veces el equipo pudo ser restaurado o puesto en línea en un intervalo de 0-6 horas, lo que indicaría que fueron fallas de poca complejidad y rápida solución, sin embargo, constituyen un problema ya que se requiere invertir varios recursos como horas mano de obra, repuestos y demás recursos logísticos y de planeación necesarios para la atención del evento de falla, etc.

- Según el análisis de los eventos de falla realizado a los sistemas de reinyección y generación se pudo determinar que la mayoría de los eventos estuvieron relacionados con componentes de instrumentación y control de los equipos.

- Con el análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) de los sistemas de Reinyección y Generación y para sus equipos correspondientes se pudo determinar que:

- Se requiere realizar una revisión de la estrategia del sistema de Generación ya que presenta gran cantidad de mantenimiento correctivo, lo que indicaría que se están dejando de incluir en el mantenimiento por estrategia actividades indispensables para el correcto funcionamiento de los equipos.

- También se pudo determinar que se presentan problemas durante el arranque de los equipos después de realizar los mantenimientos planeados o a pocas horas de su puesta en línea.

- Igualmente puede observar que tanto el sistema de generación como el de Reinyección presentan baja mantenibilidad, esto quiere decir que la restitución de los equipos luego de una falla tarda más de 2 horas en ser restituido a sus condiciones normales de operación, que esta sería el tiempo óptimo máximo para reducir pérdidas de producción.

6.2 ACCIONES DE MEJORA PROPUESTAS PARA LOS PROBLEMAS IDENTIFICADOS

Las acciones de mejora propuestas serán esbozadas mediante la metodología DMAIC vista en el Capítulo 1 Sección 2.7.

6.2.1 Plan de acción disminución de fallas disciplina de instrumentación y control. En la tabla 31 se presenta el plan de acción de las propuestas de mejora para la disciplina de instrumentación y control, ya que esta fue identificada con la mayor cantidad de modos de falla y generadora de pérdidas de producción y afectación de la confiabilidad y disponibilidad de la planta.

En la tabla 32 se encuentra el cuarto paso del ciclo DMAIC donde se plantean las diferentes acciones de mejora propuestas para el plan de disminución de fallas de los equipos del sistema de reinyección y generación, resultado del análisis de las fallas encontradas por las personas especialistas en el tema y demás involucrados en el plan de mejora.

Tabla 31. Plan de disminución de fallas disciplina de instrumentación y control.

Título	Plan de disminución de fallas disciplina de instrumentación y control		
Necesidad del negocio a ser atendida	Disminuir pérdidas de producción por fallas en los equipos y reducción de costos por atención de fallas		
Alcance	Equipos sistema de reinyección y generación		
Roles y responsabilidades	Ingeniero máquinas rotativas: Líder del proyecto Ingeniero de planta: Gerente del proyecto Ingeniero de instrumentación y control: Asesor técnico Supervisor instrumentación: Asesor técnico Técnicos de mantenimiento: Asesores operativos		
Fecha inicio		Fecha planeada para finalizar	
1. Definir (Problema, oportunidad, etc.)		4. Mejorar (Acciones propuestas)	
Los sistemas de instrumentación y control de la planta presentan desviaciones o fallas que han incrementado las pérdidas de producción e incrementado el riesgo de incidentes		<ul style="list-style-type: none"> • Hacer campaña de revisión y corrección de tubería e IJB de instrumentación • Cambiar tarjetas SIL en transmisores de nivel • Hablar con representante de marca para el suministro de nuevos componentes de I&C • Realizar aclaraciones en las catalogaciones de repuestos • Realizar cambio por obsolescencia de componentes identificados 	
2. Medir (Métricas, indicadores)		5. Controlar	
Indicador técnico: Desviaciones corregidas/Desviaciones identificadas por mes Indicador de negocio: Fallas por Instrumentación & control/pérdidas de producción		<ul style="list-style-type: none"> • Realizar seguimiento a las acciones de mejora propuestas para controlar su cumplimiento dentro de las fechas propuestas • Identificar desviaciones, para poder tomar las acciones correctivas necesarias para el cumplimiento de la ejecución de las acciones propuestas. 	
3. Analizar (Encontrar causa raíz)		Beneficios	
Baja confiabilidad de los sistemas de generación y reinyección <ul style="list-style-type: none"> • Porqué: Continuas fallas de los equipos de los sistemas • Porqué: Falla en los sistemas de instrumentación y control • Porqué: Instrumentación con deficiencia • Porqué: Instrumentos defectuosos, obsoletos o dañados 		<ul style="list-style-type: none"> •Aumentar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos del sistema de reinyección y generación de la planta. •Actualización de los sistemas de Instrumentación y control críticos de los equipos. •Disminuir los cambios inesperados en la programación de las actividades de mantenimiento. 	
		Estandarizar	
		<ul style="list-style-type: none"> • Realizar los cambios en la estrategia de mantenimiento necesarios. • Elaborar formatos y procedimientos requeridos para las actividades. • Realizar entrenamiento al personal técnico de los nuevos componentes y su mantenimiento. 	
		Oportunidad de réplica	
		En los demás sistemas de la planta	

Tabla 32. Acciones cuarto paso del ciclo DMAIC plan disminución de fallas de instrumentación & control.

Falla	Actividad de mejora	Observaciones
Fallas en el sistema de incremento térmico	Cambio de cableado del sistema de incremento térmico Medición de resistencia de aislamiento en el lazo de los sensores	
Fallas de sensores de gas	Campaña de actualización por el modelo nuevo	<ul style="list-style-type: none"> • Asegurar existencia de repuestos • Realizar el cambio en el mantenimiento trimestral (se puede realizar en línea) • Asegurar procedimiento adecuado, según especificaciones del vendedor
Falla sensores de vibración	Revisar conexiones y ajustar torque	<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar formato para realizar control de calidad al proceso de instalación de los sensores
Falla en posicionadores de válvulas de reciclo	Realizar prueba piloto para actualizar a un posicionador inteligente	
Falla electroválvulas	Realizar revisión y diagnóstico del estado actual de las electroválvulas, de las bobinas y limpieza	
Fallas servomecanismos	Realizar pruebas funcionales a los servomecanismos de las IGV, Nozzless, GVC, SRV	
Falla termocuplas	Realizar revisión y diagnóstico de las termocuplas de las turbinas	
Ejecución pruebas operativas a los equipos de instrumentación (Pruebas SIL)	Cumplimiento estricto en la planeación y ejecución de las pruebas SIL	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustar la estrategia de mantenimiento para realizar las pruebas SIL por sistema. • Asegurar que durante las pruebas se capturen los tiempos de apertura y cierre de las válvulas • Establecer formato para el registro de los tiempos de respuesta de las válvulas, donde se incluyan los valores de referencia para diagnosticar su correcto funcionamiento.

6.2.2 Plan de acción baja confiabilidad de los equipos. De acuerdo al análisis de confiabilidad realizado para los sistemas de reinyección y generación, estos se encuentran en el área de fallas prematuras de la curva de la bañera. Según la información obtenida se pudo determinar que se han presentado fallas al poco tiempo de un mantenimiento preventivo o correctivo o se presentan falla en el arranque, afectando la confiabilidad de los equipos, en tabla 33 se encuentra el plan de mejora para las fallas ocurridas después de realizado un mantenimiento al equipo, ya que si no se realiza un análisis y eliminación de la causa de la avería existe el riesgo que el equipo vuelva a averiarse. Para mejorar la confiabilidad de los sistemas se necesita disminuir la cantidad de fallas que generan interrupciones no programadas, de manera que se pueda tener la disponibilidad requerida por operaciones. Las fallas prematuras en esta etapa se caracteriza por tener una elevada tasa de fallas, que pueden deberse a diversas razones como: equipos defectuosos, instalaciones incorrectas, desconocimiento del equipo por parte de los técnicos. Las acciones para mejorar la confiabilidad de los sistemas son:

- Realizar entrenamientos al personal para mejorar sus aptitudes, revisar, y/o crear los procedimientos adecuados para las actividades de mantenimiento.
- Desarrollar un análisis profundo del origen de las fallas. Para esto se puede usar la metodología análisis de los modos y efectos de las fallas (AMEF), que es aplicable para la detección y eliminación de los modos de falla potenciales de los componentes (Item mantenibles para la norma (ISO-14224, 2006)), trayendo como beneficios ahorros en los costos de reparación, las pruebas repetitivas, los tiempos fuera de servicio de los equipos y las pérdidas de producción.
- A partir de los resultados de este análisis se puede realizar un PMO para realizar una revisión del plan de mantenimiento, de cada componente, de cada equipo, que constituyen el sistema, con el que se busca mejorar el tiempo medio entre fallos (MTBF) de los sistemas estudiados, y definir el mantenimiento más apropiado para lograr que los equipos cumplan con su función, con el objetivo de lograr equipos más confiables.

Tabla 33. Plan de acción baja confiabilidad de los equipos.

Título	Baja confiabilidad de los equipos		
Necesidad del negocio a ser atendida	Aumentar confiabilidad de los equipos		
Alcance	Equipos sistema de Reinyección y Generación		
Roles y responsabilidades	Ingeniero máquinas rotativas: Líder del proyecto Ingeniero de planta: Gerente del proyecto Supervisores de disciplinas: Asesores técnicos Planeadores de mantenimiento: Asesores operativos Técnicos de mantenimiento: Asesores operativos		
Fecha inicio		Fecha planeada para finalizar	
1. Definir (Problema, oportunidad, etc.)		4. Mejorar (Acciones propuestas)	
La alta frecuencia de fallas en el sistema de Reinyección y Generación provoca pérdidas de producción y altos costos de mantenimiento.		<ul style="list-style-type: none"> Realizar un análisis de modo y efecto de fallas (AMEF) para determinar las causas de las fallas infantiles. Realizar PMO a la estrategia existente para ayudar a definir la estrategia más apropiada. Entrenamiento a técnicos. Revisión y actualización de procedimientos. 	
2. Medir (Métricas, indicadores)		6. Controlar	
Indicador técnico: Frecuencia de fallas Indicador de negocio: Fallas / pérdidas de producción		<ul style="list-style-type: none"> Formar el equipo que realizará el AMEF Identificar y examinar todas las formas posibles que puedan ocurrir fallas Realizar PMO (Mantenimiento basado en confiabilidad) para determinar las tareas necesarias orientadas a prevenir los modos de falla existentes. 	
3. Analizar (Encontrar causa raíz)		Beneficios	
<ul style="list-style-type: none"> Baja confiabilidad equipos Porqué: Alta frecuencia de fallas Porqué: Fallas prematuras Porqué: Funcionamiento no adecuado de componentes		<ul style="list-style-type: none"> Aumento de la confiabilidad de los sistemas de reinyección y Generación Reducción de costos por fallas (menos uso de HH y repuestos). Reducción de pérdidas de producción. Aumento de la seguridad de las personas e instalaciones. Extensión de la vida útil de los componentes. 	
		Estandarizar	
		<ul style="list-style-type: none"> Realizar los cambios en la estrategia de mantenimiento necesarios. Elaborar formatos y procedimientos requeridos para las actividades. 	
		Oportunidad de réplica	
		En los demás sistemas de la planta	

6.2.3 Plan de acción baja mantenibilidad.

La mantenibilidad esta inversamente relacionada con la duración (horas) y el esfuerzo (horas-hombre) requerido por las actividades de mantenimiento.

Tabla 34. Plan de acción para Baja mantenibilidad.

Título	Baja mantenibilidad		
Necesidad del negocio a ser atendida	Disminuir los tiempos de recuperación de los equipos		
Alcance	Equipos sistema de reinyección y generación		
Roles y responsabilidades	Líder de mantenimiento: Líder del proyecto Ingeniero de planta: Gerente del proyecto Supervisores de disciplinas: Asesores técnicos Planeadores de mantenimiento: Asesores operativos Técnicos de mantenimiento: Asesores operativos		
Fecha inicio		Fecha planeada para finalizar	
1. Definir (Problema, oportunidad, etc.)		4. Mejorar (Acciones propuestas)	
La baja mantenibilidad de los equipos aumenta el tiempo de indisponibilidad, lo que origina la insatisfacción de los usuarios y pérdidas de producción.		<ul style="list-style-type: none"> • Identificar modos de fallo con baja mantenibilidad • Identificar nivel de especialización de los técnicos ejecutores del mantenimiento • Revisar y mejorar procedimientos de mantenimiento • Evaluar si se cuenta con los equipos y herramientas adecuadas. • Realizar gestión del inventario para mantener la cantidad adecuada de repuestos 	
2. Medir (Métricas, indicadores)		7. Controlar	
Indicador técnico: MTTR Indicador de negocio: MTTR / Pérdidas de producción.		<ul style="list-style-type: none"> • Seguimiento y control de cumplimiento de las acciones correctivas. 	
3. Analizar (Encontrar causa raíz)		Beneficios	
<ul style="list-style-type: none"> • Baja mantenibilidad Porqué: Alta duración de los tiempos de reparación de los equipos Porqué: No adecuada gestión del mantenimiento Porqué: No se ha realizado evaluación de factores que inciden en la atención de fallas de los equipos		<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la disponibilidad de los equipos. • Reducción de costos por fallas (menos uso de HH y repuestos). • Reducción de pérdidas de producción. • Aumento de la productividad. 	
		Estandarizar	
		<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar formatos y procedimientos requeridos para las actividades. • Realizar entrenamiento al personal técnico según cargo y necesidades identificadas. 	
		Oportunidad de réplica	
		En los demás sistemas de la planta	

Las estrategias para mejorar la gestión de mantenimiento o mantenibilidad de los sistemas estudiados son presentadas en la tabla 35.

Tabla 35. Acciones cuarto paso ciclo DMAIC plan baja mantenibilidad.

Acción de mejora	Observaciones
Identificar modos de fallo con baja mantenibilidad.	
Revisar y mejorar procedimientos de mantenimiento.	
Evaluar si se cuenta con los equipos y herramientas adecuadas.	Identificar las herramientas, equipos e instrumentos necesarios para cada actividad de mantenimiento. Realizar la renovación de los que se encuentren deteriorados o inoperativos.
Identificar nivel de especialización de los técnicos ejecutores del mantenimiento.	Realizar un plan de capacitación y desarrollo del recurso humano, para preparar al personal para la ejecución eficiente de sus responsabilidades, brindar oportunidades de desarrollo y modificar actitudes para crear un clima laboral mejor.

6.2.4 Plan de acción disminución de costos disciplina mecánica.

Tabla 36. Plan de disminución de costos disciplina mecánica.

Título	Plan de disminución de costos disciplina de mecánica		
Necesidad del negocio a ser atendida	Disminuir costos por mantenimientos correctivos en los equipos.		
Alcance	Equipos sistema de Reinyección		
Roles y responsabilidades	Ingeniero máquinas rotativas: Líder del proyecto Ingeniero de planta: Gerente del proyecto Supervisor mecánica: Asesor técnico Técnicos de mantenimiento: Asesores operativos		
Fecha inicio		Fecha planeada para finalizar	
1. Definir (Problema, oportunidad, etc.)		4. Mejorar (Acciones propuestas)	
El sistema de reinyección presenta los costos más elevados por atención a mantenimientos correctivos, incrementando el gasto y afectando su competitividad.		<ul style="list-style-type: none"> • Corregir fugas de aceite del sistema hidráulico. • Realizar análisis de condición operativa que afecta el sello de aceite. • Identificar causas de la alta presión diferencial y taponamiento de los filtros. 	

2. Medir (Métricas, indicadores)	8. Controlar
<p>Indicador técnico: Cantidad de mantenimientos correctivos disciplina de mecánica por mes</p> <p>Indicador de negocio: Costo mantenimiento correctivo disciplina mecánica / costo total mantenimiento correctivo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar seguimiento a las acciones de mejora propuestas para controlar su cumplimiento dentro de las fechas propuestas • Identificar desviaciones, para poder tomar las acciones correctivas necesarias para el cumplimiento de la ejecución de las acciones propuestas.
3. Analizar (Encontrar causa raíz)	Beneficios
<p>Altos costos por mantenimiento correctivo disciplina de mecánica</p> <ul style="list-style-type: none"> • Porqué: Fallas de los componentes mecánicos de los equipos • Porqué: Aplazamiento mantenimientos mayores • Porqué: Falta de repuestos de componentes mayores • Porqué: Se tuvieron que utilizar en la falla de otros equipos 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimización del uso de la mano de obra (horas-hombre) y de repuestos. • Reducción de costos • Minimizar los tiempos de parada o de indisponibilidad de los equipos • Disminuir los cambios inesperados en la programación de las actividades de mantenimiento.
	Estandarizar
	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar los cambios en la estrategia de mantenimiento necesarios. • Elaborar formatos y procedimientos requeridos para las actividades.
	Oportunidad de réplica
	En los demás sistemas de la planta

Tabla 37. Acciones de mejora propuestas para el plan de disminución de costos de la disciplina mecánica

Modo de falla	Acción de mejora
Cojinete: sellos	Ciclos de surge en Compresores centrífugos originados por condiciones operativas: Instalar cheques STOCKHAM en la descarga de los compresores.
Turbina: recuperación nivel de aceite	Degradación del aceite de lubricación de las Turbinas: Presencia de Barnices: <ul style="list-style-type: none"> • Presentar propuestas de alquiler o compra del equipo ISOPURE. • Realizar pruebas especiales de aceite para Turbomaquinaria (RPVOT).
Filtros casa de filtros: Alta presión diferencial	Cambio de Set de pre-filtros de aire
Sistema hidráulico: Alta presión diferencial	Cambio del Cilindro hidráulico actuador de los Nozzles en las unidades, por cumplimiento de vida útil 150.000 horas.
Bloqueo del Tren Eje de baja de la turbina (TNL).	Asegurar las siguientes acciones al realizar una parada de la unidad: <ul style="list-style-type: none"> • Reestablecer la constante de giro TNL a 60% • Parada controlada de la unidad • Realizar la lubricación completa en el tiempo establecido • Verificación del Giro Libre del Eje de baja.

6.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- La implementación de las acciones de mejora propuestas brinda oportunidades claras para el mejoramiento de la gestión de mantenimiento de la planta, aumentando la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de sus sistemas y equipos.
- Hacer seguimiento a las acciones de mejora propuestas permitirá tener control sobre la implementación, identificando las desviaciones y tomando las acciones correctivas necesarias para llevar a cabo las propuestas de mejora de acuerdo a las necesidades.

7. CONCLUSIONES

- El análisis estadístico de los datos de mantenimiento realizado permitió determinar cómo ha sido la gestión del mantenimiento en la planta a través del tiempo, identificar malos actores y plantear propuestas de acciones de mejora que permitirán la optimización de los recursos, humanos, físicos y organizativos para el mejoramiento de la gestión del mantenimiento en la organización.

- Se seleccionaron 2 sistemas de producción de la planta como malos actores resultado del análisis de la información, el sistema de generación y el sistema de reinyección y cuáles fueron los modos de falla causantes de esto. Estos representan una parte importante en la planta, una falla ocasiona un aumento en las pérdidas de producción y una gran quema de gas, las cuales son controladas según regulaciones estatales.

- Las propuestas de mejora fueron enfocadas a las disciplinas de instrumentación y mecánica, las cuales son las que originan los más altos costos de mantenimiento correctivo.

- A partir del análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD), se pudo determinar tres de los principales indicadores de mantenimiento clasificados como de clase mundial, como son el tiempo medio entre fallas, tiempo medio para la reparación y disponibilidad de equipos. Logrando la identificación de posibles oportunidades de mejora que permitirían la optimización de los recursos de la empresa y mejorar el sistema de gestión de mantenimiento para tener una planta confiable, mantenible y disponible cuando se requiera.

- El análisis Weibull, es una distribución que es frecuentemente usada en el análisis de confiabilidad, es muy útil cuando se tiene histórico de datos de falla ya que esta estima lo que otras distribuciones no, puede describir las fallas por mortalidad

infantil, las fallas por azar o aleatorias y las fallas por desgaste. También es útil en la optimización de los intervalos y costos de mantenimiento, los cuales pueden ser modificados según la tasa de falla, también es útil para programar o no programar un mantenimiento, en el reemplazo de partes y periodos de inspección.

➤ A partir del análisis CMD realizado se pudo determinar que equipos tuvieron un mayor impacto en lo que respecta al mantenimiento, eligiéndose como mal actor para el sistema de generación el equipo G1 y para el sistema de reinyección el equipo T5.

➤ Los pronósticos realizados para los equipos T5 y G1, de los parámetros TBF y TTR, deben ser usados como una herramienta para la gestión del mantenimiento, pero teniendo en cuenta que son proyecciones futuristas de sucesos que pueden ocurrir, para planear estratégicamente las acciones a efectuar en el presente para estar preparados a enfrentar las amenazas futuras y de esta forma aprovecharlos.

➤ El conocer el pronóstico de los parámetros, tiempo entre fallas (TBF) y el tiempo para reparar (TTR), permitirá realizar los ajustes correspondientes a la programación y también el estar preparados con los recursos físicos y humanos para atender o adelantarse a la ocurrencia del evento de falla del equipo.

➤ El análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad (CMD) y los pronósticos permiten conocer con un cierto grado de certeza el comportamiento de la planta y los equipos que tienen el mayor aporte a la indisponibilidad, permitiendo establecer estrategias que permitan una mayor competitividad a la empresa en su gestión y operación del mantenimiento.

➤ Las acciones de mejora propuestas pueden dar excelentes resultados, en el aumento de la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos, así como en el incremento de la productividad y la disminución de los costos de mantenimiento.

8. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis de modos y efectos de falla (AMEF), para identificar y prevenir problemas o fallas que induzcan la pérdida de función de los equipos, afectando su confiabilidad y disponibilidad, aumentando costos de operación y mantenimiento, generando pérdidas de producción y hasta afectando la seguridad de la planta.

- Realizar PMO que permita actualizar la estrategia de mantenimiento de acuerdo a las nuevas condiciones de la planta y estado actual de los equipos, a una estrategia más adecuada, según los modos de falla y tasas de fallas presentados.

- Hacer seguimiento al modelo de pronóstico propuesto para cada uno de los parámetros y equipos, para determinar si este describe correctamente el comportamiento de la serie de datos. De no ser así realizar los análisis y ajustes correspondientes para hallar el modelo ajustado, si es el adecuado utilizarlo para predecir o estimar los valores futuros de estas variables ya que son sencillos de manipular e implementar para los demás equipos de la planta.

- Es recomendable realizar nuevos cálculos cada vez que ocurra un nuevo evento o cada vez que se incremente el tiempo estudiado en un 10%, aunque depende de las necesidades en particular de cada equipo o sistema que se quiera pronosticar.

- Realizar control a la implementación de las acciones de mejora propuestas, para tomar decisiones correctivas de ser necesario.

- Promover el uso diferentes metodologías que permitan la optimización de los procesos de la organización y no solo para el área de mantenimiento.

9. BIBLIOGRAFÍA

AMENDOLA, L. J. Modelos Mixtos de Confiabilidad. Datastream. 2002

BARUSSO LAFRAIA, J. R. Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade. QUALITYMARK. 2001.

CARTAGENA, Jadeth. Desarrollo de un modelo para evaluar la disponibilidad y confiabilidad en un sistema de bombeo. Tesis Maestría. Universidad ICESI. 2012

DHILLON, B. S. Engineering Maintainability. ScienceDirect. 1999.

DU, J. Evaluation of equipment reliability, availability and maintainability in an oil sands processing plant. Tesis Maestría. Universidad de British Columbia. 2008.

ESCALANTE, Valencia. Seis Sigma Metodología y técnicas. LIMUSA. 2005

GARCÍA PALENCIA, O., & GONZÁLEZ, H. Á. Modelo mixto de confiabilidad basado en estadística para la optimización del mantenimiento industrial. 2003.

GUTIÉRREZ, Humberto & DE LA VARA SALAZAR, Román. Control estadístico de calidad y seis sigma. Mc Graw Hill Interamericana Editores. Vol. 2da. ed. 2009.

HERNÁNDEZ, K. J. & LÓPEZ, Iván Diego, D. (2013). Mejora continua de los procesos basados en la metodología Seis Sigma. Tesis de grado. Universidad Católica de Colombia.

ISO-14224. ISO-14224 - *Petroleum, petrochemical and natural gas industries-Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.* (2006).

LARRARTE, Andrés. Propuesta de mejoramiento del proceso de producción de la planta trilladora de la cooperativa departamental cafetera de Cundinamarca (COODECAFEC). Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana. 2009.

LÓPEZ, Karen Julieth & DUCUARA, Eliana Marcela. Propuesta de mejora basado en la metodología seis sigma en el proceso de soldadura de la empresa metalmecánica. "LOS PINOS." Tesis de grado. Universidad de San Buenaventura, Seccional Medellín. 2012.

MAHENDRA GOR, Ravi. Forecasting Technique. In Industrial Statistics and Operational Management. 2009. p. 55

Montgomery, D. C. (2008). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. LIMUSA.

MORA, Luis Alberto. Pronósticos de Demanda e Inventarios. *COLDI*. 2006

MORA, Luis Alberto. Mantenimiento Industrial Efectivo. COLDI Limitada (COLDI Limi). 2009.

MURILLO, William. Confiabilidad y análisis estadístico para la predicción de fallas, seguridad, supervivencia, riesgo, costo y garantías de los equipos. [En línea]. Disponible < <https://goo.gl/j5xihL>>

------. RAM Eliminando los malos Actores. [En línea]. Disponible en <<http://www.rcmingeneria.com/node/12>>

NAHMIAS, Steve. Análisis de la producción y las operaciones. McGraw Hill. 2007.

NASERI, Masound. *RAM Analysis of Oil and Gas Production Facilities Operating in the Arctic Offshore*. Tesis Doctoral. Universidad del Ártico de Noruega. 2016.

NAVARRO, Elola & MUGABURU, J. M. Gestión Integral de Mantenimiento. S.A. MARCOMBO. 1997.

CRESPO, A., & FYGUEROA, S. Modelo integral para optimizar la confiabilidad en instalaciones petroleras. In *VI Congreso Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento*. 2004. p 11.

PÉREZ GUZMÁN, Juan. (2014). Pronóstico De Demanda Y Precios De Energía En Un Mercado Eléctrico. Tesis Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, p 1–113.

PUPO, Iván Enrique. Estrategias de mantenimiento y operación en línea de trituración y apilamiento Cerro Matoso S.A. Montelíbano – Colombia, desde el análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad alcanzada. Tesis Maestría. Universidad EAFIT. 2014

RAMÍREZ, Samuel. Análisis de datos de falla. Tesis Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. 2014.

RIOS, Gonzalo (2008). Series de Tiempo. Universidad de Chile. [En línea]. Disponible en < <https://goo.gl/eYt4JP>>

SALAZAR MORENO, Raquel & PÉREZ SOTO, Francisco. (2013). Aplicaciones de la distribución *Weibull* en ingeniería de confiabilidad. In Memoria del XXI Coloquio Mexicano de Economía Matemática y Econometría.

SCHROEDER, Roger. Administración de operaciones, toma de decisiones en la función de operaciones. McGraw Hill. 1996.

SPIEGEL, Murray & STEPHENS, L. J. Estadística. McGraw Hill. (2009).

TORO OSORIO, J. C & CÉSPEDES GUTIÉRREZ, P. A. Metodología para medir confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad en mantenimiento. Universidad EAFIT. 2001.

UPARELA SAAD, José Manuel. (2013). Medición estratégica CMD en el sistema de vapor de una planta química en el departamento del atlántico. Tesis Especialización. Universidad EAFIT.

WIREMAN, Terry. Benchmarking BEST Practices in Maintenance Management. Industrial Press, Inc. Industrial Press, Inc. (2003).

ZAPATA, Andreina. Análisis estadístico de la gestión del mantenimiento. Universidad Nor-Oriental Privada Gran Mariscal de Ayacucho. 2012

ANEXOS

ANEXO A. Datos parámetros

Sistema de Reinyección T1					Sistema de Reinyección T2				
TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp	TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp
12.00			36.95		6.117			35.250	
96.00	577.50	565.50	198.80	7252.75	1.250	4051.250	4045.133	183.500	8867.167
332.70	96.00	0.00	394.58	4696.53	4.533	3526.400	3525.150	1.000	439.417
0.92	3445.62	3112.92	0.92	100.85	1.633	4.533	0.000	432.233	2692.767
1.72	129.10	128.18	7.65	5990.68	1.267	334.750	333.117	98.467	9360.283
10.45	1074.33	1072.62	37.75	35.00	1.167	1874.700	1873.433	62.000	11768.333
0.37	28.63	18.18	6.80	3188.60	1.567	907.200	906.033	9.417	16137.500
0.80	5160.32	5159.95	77.87	13.25	5.500	1249.567	1248.000		
0.75	443.08	442.28	384.00	4736.73	0.750	606.117	600.617		
73.05	282.42	281.67	80.42	9819.83	7.733	0.933	0.183		
2.32	1358.68	1285.63	303.90	1836.35	0.383	19.983	12.250		
167.17	1668.00	1665.68			10.667	0.583	0.200		
13.25	1456.57	1289.40			7.700	6.683	8.017		
0.67	10421.75	10408.50			1.000	16.283	8.583		
1.60	7763.02	7762.35			14.217	4.917	3.917		
					19.133	19.083	4.867		
					1.283	8397.617	8378.483		
					0.583	398.933	397.650		
					2.267	1180.450	1179.867		
					167.583	87.983	85.717		
					57.000	4446.433	4278.850		
					0.800	3951.150	3894.150		
					4.783	5275.983	5275.183		
					80.417	592.700	587.917		
					3.800	2249.367	2168.950		
					16.733	643.400	639.600		
					56.900	1474.750	1458.017		
					0.800	283.850	226.950		
					56.217	2248.533	2247.733		

Sistema de Reinyección T3					Sistema de Reinyección T4				
TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp	TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp
1.700			228.950		2.717			43.017	
0.667	6913.033	6911.333	417.283	3088.967	2.217	69.067	66.350	203.450	7280.333
0.567	3309.800	3309.133	73.283	9394.95	1.117	1323.050	1320.833	94.800	4692.617
0.500	77.850	77.283	85.483	8639.017	4.000	3619.717	3618.600	71.783	334.033
0.600	1.117	0.617	431.983	8088.0167	3.000	3559.333	3555.333	68.500	5979.683
0.633	0.633	0.033	57.450	12744.4	0.667	237.333	234.333	49.667	23754.333
16.450	1097.317	1096.683			3.667	0.667	0.000	51.750	160.250
6.500	4964.950	4948.500			7.800	94.200	90.533	624.000	9154.000
169.933	3806.250	3799.750			0.583	890.300	882.500		
186.600	169.933	0.000			12.000	47.833	47.250		
4.033	784.700	598.100			3.783	26.883	14.883		
2.000	266.617	262.583			2.467	431.983	428.200		
19.633	10657.817	10655.817			0.283	1777.583	1775.117		
6.750	257.100	237.467			18.117	1217.533	1217.250		
53.333	337.250	330.500			2.200	8263.417	8245.300		
33.350	2164.533	2111.200			0.717	2.467	0.267		
14.150	1038.150	1004.800			187.983	674.983	674.267		
277.717	589.933	575.783			1.150	2011.567	1823.583		
5.033	584.683	306.967			25.167	6034.250	6033.100		
49.667	3093.367	3088.333			1.167	2947.433	2922.267		
51.750	209.917	160.250			1.417	3496.950	3495.783		
9.383	1167.417	1115.667			105.317	446.550	445.133		
					12.700	1184.367	1079.050		
					21.333	420.700	408.000		
					5.417	2878.583	2857.250		
					1588.283	14.633	9.217		
					20.567	1589.217	0.933		
					11.983	53.867	33.300		

Sistema de Reinyección T5					Sistema de Reinyección T6				
TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp	TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp
1.550			89.500		2.467			338.833	
10.217	3723.083	3721.533	63.633	7794.283	1.100	407.217	404.750	67.950	3226.383
2.000	31.600	21.383	403.933	2900.617	7.667	2213.200	2212.100	427.567	7383.100
0.450	9905.483	9903.483	94.083	6075.783	12.767	1059.883	1052.217	72.200	9198.300
2.550	7.217	6.767	90.333	3052.750	0.567	8183.733	8170.967	113.683	9956.567
2.883	116.233	113.683	104.783	9938.717	2.167	15.050	14.483		
0.400	3.083	0.200			1.083	674.550	672.383		
6.933	1048.900	1048.500			6.333	503.633	502.550		
0.567	247.283	240.350			16.750	3149.533	3143.200		
26.667	2926.667	2926.100			1.350	1217.667	1200.917		
2.050	3718.033	3691.367			7.800	3889.450	3888.100		
45.233	803.967	801.917			56.383	626.450	618.650		
0.883	46.117	0.883			0.400	56.600	0.217		
0.450	1.200	0.317			160.383	1.433	1.033		
1.017	429.917	429.467			3.700	784.700	624.317		
173.450	767.333	766.317			1.983	313.833	310.133		
42.500	9205.767	9032.317			3.667	4253.283	4251.300		
4.717	367.733	325.233			2.500	2710.400	2706.733		
14.333	750.350	745.633			1.500	5562.700	5560.200		
1.167	808.667	794.333			3.250	5237.400	5235.900		
12.333	5420.750	5419.583			1.250	1992.500	1989.250		
15.500	90.167	77.833							
14.500	134.667	119.167							
16.667	33.500	19.000							
6.250	388.917	372.250							
9.617	187.133	180.883							
3.050	343.733	334.117							
4.000	406.883	403.833							
2.417	28.583	24.583							
12.000	157.583	155.167							
35.417	1313.583	1301.583							
1.467	167.617	132.200							
1.400	2136.067	2134.600							

Sistema de Generación G1					Sistema de Generación G2				
TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp	TTR	TBF	TBMc	Mp	TBMp
3.12			15.15		0.82			11.58	
17.28	6981.72	6978.60	110.57	6847.95	2.68	892.23	891.42	66.00	3346.53
1.07	453.50	436.22	23.20	3225.13	7.08	9051.28	9048.60	70.85	2193.98
0.78	17.75	16.68	17.28	2847.83	5.85	18.43	11.35	13.22	800.87
0.80	2590.60	2589.82	11.93	11502.78	0.88	9970.90	9965.05	13.25	3769.53
0.63	5480.13	5479.33	258.02	2265.23	4.68	11463.37	11462.48	3.00	12032.08
9.78	614.12	613.48	76.03	4594.05	16.00	9662.43	9657.75	5.00	3783.05
20.00	5061.80	5052.02	333.08	8145.17				13.48	1171.50
1.20	1332.07	1312.07	19.40	11601.17				324.08	8530.52
2.52	8884.10	8882.90	20.87	71.50				16.70	8412.87
17.67	7962.23	7959.72						42.57	3127.40

ANEXO B. Cálculos pronósticos

Tabla 38 . Cálculo de pronóstico parámetro TBF G1

Datos	TBF (Dt)	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia			
		Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble-Holt		
		PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2		RL	St	Gt
1	6981.72			3937.80	3986.83	1838.95	1372.53	466.41	
2	453.50			4242.19	4585.81	2305.36	1561.86	438.70	1838.95
3	17.75	3717.61		3863.32	3759.34	2771.77	1604.00	399.05	2000.56
4	2590.60	235.62	2484.32	3478.77	3011.03	3238.18	2120.56	410.80	2003.05
5	5480.13	1304.18	1020.62	3389.95	2926.94	3704.60	3121.11	469.77	2531.35
6	614.12	4035.37	2696.16	3598.97	3437.58	4171.01	2995.53	410.24	3590.88
7	5061.80	3047.13	2894.95	3300.48	2872.89	4637.42	3736.98	443.36	3405.77
8	1332.07	2837.96	3718.68	3476.61	3310.67	5103.83	3610.68	386.39	4180.33
9	8884.10	3196.93	2335.99	3262.16	2914.95	5570.24	4974.48	484.13	3997.07
10	7962.23	5108.08	5092.66	3824.35	4108.78	6036.66	5959.34	534.21	5458.61
12		8423.17	6059.47	4238.14	4879.47	6969.48			6493.54
13		7962.23	8423.17	3814.33	3903.58	7435.89			7027.75
14			7962.23	3432.89	3122.86	7902.31			7561.96
15									8096.16
16									8630.37

Tabla 39. Cálculo del error

Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia		Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
		-3043.91	-2994.89	-5142.77				3043.91	2994.89	5142.77	
		3788.69	4132.31	1851.86	1385.45			3788.69	4132.31	1851.86	1385.45
3699.9		3845.57	3741.59	2754.02	1982.81	3699.86		3845.57	3741.59	2754.02	1982.81
-2355.0	-106.28	888.17	420.43	647.58	-587.55	2354.98	106.28	888.17	420.43	647.58	587.55
-4176.0	-4459.52	-2090.18	-2553.19	-1775.54	-2948.78	4175.96	4459.52	2090.18	2553.19	1775.54	2948.78
3421.2	2082.04	2984.85	2823.46	3556.89	2976.77	3421.25	2082.04	2984.85	2823.46	3556.89	2976.77
-2014.7	-2166.85	-1761.32	-2188.91	-424.38	-1656.03	2014.67	2166.85	1761.32	2188.91	424.38	1656.03
1505.9	2386.62	2144.55	1978.60	3771.77	2848.27	1505.89	2386.62	2144.55	1978.60	3771.77	2848.27
-5687.2	-6548.11	-5621.94	-5969.15	-3313.86	-4887.03	5687.17	6548.11	5621.94	5969.15	3313.86	4887.03
-2854.1	-2869.58	-4137.88	-3853.45	-1925.58	-2503.62	2854.15	2869.58	4137.88	3853.45	1925.58	2503.62

Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e^2 PMS N=2	e^2 PMS N=3	e^2 SES 0.1	e^2 SES 0.2	e^2 RL	e^2 SED	e/Dt PMS N=2	e/Dt PMS N=3	e/Dt SES 0.1	e/Dt SES 0.2	e/Dt RL	e/Dt SED
		9265418.53	8969361.12	26448083.27				0.436	0.429	0.737	
		14354195.91	17075947.37	3429381.34	1919462.47			8.354	9.112	4.083	3.055
13688951.69		14788438.24	13999527.66	7584632.28	3931537.96	208.443		216.652	210.794	155.156	111.708
5545907.25	11294.97	788839.67	176757.53	419364.17	345220.20	0.909	0.041	0.343	0.162	0.250	0.227
17438628.00	19887288.90	4368867.13	6518794.51	3152534.40	8695295.87	0.762	0.814	0.381	0.466	0.324	0.538
11704951.56	4334909.07	8909338.50	7971939.16	12651474.38	8861144.38	5.571	3.390	4.860	4.598	5.792	4.847
4058915.36	4695238.92	3102237.51	4791342.41	180098.38	2742438.65	0.398	0.428	0.348	0.432	0.084	0.327
2267709.71	5695939.11	4599086.34	3914867.92	14226215.41	8112628.04	1.130	1.792	1.610	1.485	2.832	2.138
32343864.69	42877686.37	31606210.35	35630767.49	10981638.64	23883019.55	0.640	0.737	0.633	0.672	0.373	0.550
8146172.22	8234476.62	17122046.03	14849110.73	3707845.50	6268111.45	0.358	0.360	0.520	0.484	0.242	0.314

	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
	ME	-1057.49	-1668.81	-300.34	-446.32	0.00
MAD	3214.24	2945.57	3030.71	3065.60	2516.42	2419.59
MSE	11899387.56	12248119.14	10890467.82	11389841.59	8278126.78	7195428.73
MAPE	27.28	1.08	23.41	22.86	16.99	13.74
σ_e	4017.80	3681.96	3788.38	3832.00	3145.53	3024.49

Tabla 40. Cálculo del pronóstico parámetro TTR G1

Datos	TTR (Dt)	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia			
		Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal		Suavización exponencial doble-Holt	
		PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2	RL	St	Gt	SED
1	3.12			6.80	6.03	4.01	3.45	0.56	
2	17.28			6.44	5.45	4.57	6.66	0.82	4.01
3	1.07	10.20		7.52	7.81	5.13	6.20	0.70	7.49
4	0.78	9.18	7.16	6.88	6.46	5.69	5.68	0.57	6.90
5	0.80	0.93	6.38	6.27	5.33	6.25	5.16	0.46	6.25
6	0.63	0.79	0.88	5.72	4.42	6.80	4.63	0.36	5.63
7	9.78	0.72	0.74	5.21	3.66	7.36	5.95	0.46	4.99
8	20.00	5.21	3.74	5.67	4.89	7.92	9.13	0.73	6.41
9	1.20	14.89	10.14	7.10	7.91	8.48	8.13	0.56	9.86
10	2.52	10.60	10.33	6.51	6.57	9.04	7.45	0.44	8.69
11	17.67	1.86	7.91	6.11	5.76	9.60	9.85	0.63	7.89
12		1.86	7.91	6.11	5.76	10.16			10.48

Tabla 41. Cálculo del error

Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia		Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
		3.69	2.91	0.89				3.69	2.91	0.89	
		-10.85	-11.84	-12.72	-13.27			10.85	11.84	12.72	13.27
9.1		6.45	6.75	4.06	6.42	9.13		6.45	6.75	4.06	6.42
8.4	6.37	6.09	5.68	4.90	6.12	8.39	6.37	6.09	5.68	4.90	6.12
0.1	5.58	5.47	4.53	5.45	5.45	0.13	5.58	5.47	4.53	5.45	5.45
0.2	0.25	5.09	3.79	6.17	4.99	0.16	0.25	5.09	3.79	6.17	4.99
-9.1	-9.04	-4.57	-6.12	-2.42	-4.79	9.07	9.04	4.57	6.12	2.42	4.79
-14.8	-16.26	-14.33	-15.11	-12.08	-13.59	14.79	16.26	14.33	15.11	12.08	13.59
13.7	8.94	5.90	6.71	7.28	8.66	13.69	8.94	5.90	6.71	7.28	8.66
8.1	7.81	3.99	4.05	6.52	6.17	8.08	7.81	3.99	4.05	6.52	6.17
-15.8	-9.76	-11.56	-11.91	-8.07	-9.78	15.81	9.76	11.56	11.91	8.07	9.78

Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e ² PMS N=2	e ² PMS N=3	e ² SES 0.1	e ² SES 0.2	e ² RL	e ² SED	e/Dt PMS N=2	e/Dt PMS N=3	e/Dt SES 0.1	e/Dt SES 0.2	e/Dt RL	e/Dt SED
		13.60	8.48	0.80				1.183	0.934	0.286	
		117.67	140.11	161.68	176.21			0.628	0.685	0.736	0.768
83.42		41.65	45.52	16.49	41.24	8.563		6.050	6.325	3.807	6.020
70.42	40.61	37.11	32.27	24.04	37.42	10.713	8.135	7.777	7.252	6.259	7.809
0.02	31.11	29.88	20.50	29.65	29.71	0.156	6.972	6.832	5.660	6.807	6.813
0.03	0.06	25.87	14.36	38.08	24.92	0.250	0.395	8.031	5.983	9.744	7.882
82.20	81.80	20.91	37.44	5.85	22.96	0.927	0.924	0.467	0.625	0.247	0.490
218.79	264.42	205.41	228.36	145.86	184.66	0.740	0.813	0.717	0.756	0.604	0.679
187.46	79.90	34.82	45.03	53.02	75.02	11.410	7.449	4.918	5.592	6.068	7.218
65.34	61.01	15.96	16.42	42.57	38.09	3.212	3.104	1.587	1.610	2.592	2.452
249.90	95.28	133.52	141.81	65.07	95.58	0.895	0.553	0.654	0.674	0.457	0.553

	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
ME	-0.01	-0.76	-0.42	-0.96	0.00	-0.36
MAD	8.81	8.00	7.09	7.22	6.41	7.92
MSE	106.40	81.78	61.49	66.39	53.01	72.58
MAPE	4.10	3.54	3.53	3.28	3.42	4.07
σ_e	11.01	10.00	8.86	9.02	8.02	9.91

Tabla 42. Cálculo del pronóstico parámetro TBF T5

Datos	TBF (Dt)	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia			
		Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal RL	Suavización exponencial doble-Holt		
		PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2		St	Gt	SED
1	3723.1			1428.68	1387.88	2404.31	2467.25	-62.94	
2	31.6			1658.12	1854.92	2341.37	1929.77	-110.40	2404.31
3	9905.5	1877.34		1495.47	1490.26	2278.42	3436.59	51.32	1819.37
4	7.2	4968.54	4553.39	2336.47	3173.30	2215.48	2791.78	-18.29	3487.92
5	116.2	4956.35	3314.77	2103.55	2540.08	2152.54	2242.04	-71.43	2773.49
6	3.1	61.73	3342.98	1904.81	2055.31	2089.59	1737.10	-114.79	2170.60
7	1048.9	59.66	42.18	1714.64	1644.87	2026.65	1507.63	-126.25	1622.31
8	247.3	525.99	389.41	1648.07	1525.67	1963.70	1154.56	-148.94	1381.38
9	2926.7	648.09	433.09	1507.99	1270.00	1900.76	1389.83	-110.51	1005.62
10	3718.0	1586.98	1407.62	1649.86	1601.33	1837.82	1767.06	-61.74	1279.32
11	804.0	3322.35	2297.33	1856.67	2024.67	1774.87	1525.05	-79.77	1705.32
12	46.1	2261.00	2482.89	1751.40	1780.53	1711.93	1165.45	-107.75	1445.28
13	1.2	425.04	1522.71	1580.87	1433.65	1648.99	846.40	-128.88	1057.70
14	429.9	23.66	283.76	1422.91	1147.16	1586.04	660.00	-134.63	717.52
15	767.3	215.56	159.08	1323.61	1003.71	1523.10	573.76	-129.79	525.37
16	9205.8	598.63	399.48	1267.98	956.43	1460.15	2196.33	45.44	443.97
17	367.7	4986.55	3467.67	2061.76	2606.30	1397.21	1866.96	7.96	2241.77
18	750.4	4786.75	3446.94	1892.36	2158.59	1334.27	1650.01	-14.53	1874.92
19	808.7	559.04	3441.28	1778.16	1876.94	1271.32	1470.12	-31.07	1635.48
20	5420.8	779.51	642.25	1681.21	1663.29	1208.38	2235.39	48.57	1439.05
21	90.2	3114.71	2326.59	2055.16	2414.78	1145.43	1845.20	4.69	2283.96
22	134.7	2755.46	2106.53	1858.66	1949.86	1082.49	1506.85	-29.61	1849.89

23	33.5	112.42	1881.86	1686.26	1586.82	1019.55	1188.49	-58.49	1477.24
24	388.9	84.08	86.11	1520.99	1276.15	956.60	981.78	-73.31	1130.00
25	187.1	211.21	185.69	1407.78	1098.71	893.66	764.21	-87.74	908.48
26	343.7	288.03	203.18	1285.71	916.39	830.72	609.92	-94.39	676.47
27	406.9	265.43	306.59	1191.52	801.86	767.77	493.80	-96.56	515.53
28	28.6	375.31	312.58	1113.05	722.86	704.83	323.51	-103.94	397.24
29	157.6	217.73	259.73	1004.61	584.01	641.88	207.18	-105.18	219.57
30	1313.6	93.08	197.68	919.90	498.72	578.94	344.32	-80.94	102.00
31	167.6	735.58	499.92	959.27	661.70	516.00	244.22	-82.86	263.37
32	2136.1	740.60	546.26	880.11	562.88	453.05	556.30	-43.37	161.36
33		1151.84	1205.76	1005.70	877.52	390.11			512.94
34						327.17			469.57
35						264.22			426.21
36						201.28			382.84
37						138.33			339.48

Tabla 43. Cálculo del error

Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia		Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
		-2294.40	-2335.20	-1318.77				2294.40	2335.20	1318.77	
		1626.52	1823.32	2309.77	2372.71			1626.52	1823.32	2309.77	2372.71
-8028.1		-8410.01	-8415.23	-7627.06	-8086.11	8028.14		8410.01	8415.23	7627.06	8086.11
4961.3	4546.17	2329.25	3166.09	2208.26	3480.70	4961.33	4546.17	2329.25	3166.09	2208.26	3480.70
4840.1	3198.53	1987.31	2423.85	2036.30	2657.25	4840.12	3198.53	1987.31	2423.85	2036.30	2657.25
58.6	3339.89	1901.73	2052.23	2086.51	2167.52	58.64	3339.89	1901.73	2052.23	2086.51	2167.52
-989.2	-1006.72	665.74	595.97	977.75	573.41	989.24	1006.72	665.74	595.97	977.75	573.41
278.7	142.12	1400.78	1278.39	1716.42	1134.09	278.71	142.12	1400.78	1278.39	1716.42	1134.09
-2278.6	-2493.58	-1418.68	-1656.67	-1025.91	-1921.04	2278.57	2493.58	1418.68	1656.67	1025.91	1921.04
-2131.1	-2310.42	-2068.18	-2116.70	-1880.22	-2438.72	2131.06	2310.42	2068.18	2116.70	1880.22	2438.72
2518.4	1493.36	1052.71	1220.70	970.91	901.35	2518.38	1493.36	1052.71	1220.70	970.91	901.35
2214.9	2436.77	1705.29	1734.41	1665.81	1399.17	2214.88	2436.77	1705.29	1734.41	1665.81	1399.17
423.8	1521.51	1579.67	1432.45	1647.79	1056.50	423.84	1521.51	1579.67	1432.45	1647.79	1056.50
-406.3	-146.16	992.99	717.24	1156.12	287.60	406.26	146.16	992.99	717.24	1156.12	287.60
-551.8	-608.26	556.27	236.38	755.76	-241.97	551.77	608.26	556.27	236.38	755.76	241.97
-8607.1	-8806.28	-7937.79	-8249.33	-7745.61	-8761.80	8607.14	8806.28	7937.79	8249.33	7745.61	8761.80
4618.8	3099.94	1694.03	2238.57	1029.48	1874.04	4618.82	3099.94	1694.03	2238.57	1029.48	1874.04
4036.4	2696.59	1142.01	1408.24	583.92	1124.57	4036.40	2696.59	1142.01	1408.24	583.92	1124.57
-249.6	2632.62	969.49	1068.27	462.66	826.81	249.62	2632.62	969.49	1068.27	462.66	826.81
-4641.2	-4778.50	-3739.54	-3757.46	-4212.37	-3981.70	4641.24	4778.50	3739.54	3757.46	4212.37	3981.70
3024.5	2236.42	1964.99	2324.61	1055.27	2193.79	3024.54	2236.42	1964.99	2324.61	1055.27	2193.79
2620.8	1971.86	1724.00	1815.19	947.82	1715.23	2620.79	1971.86	1724.00	1815.19	947.82	1715.23

78.9	1848.36	1652.76	1553.32	986.05	1443.74	78.92	1848.36	1652.76	1553.32	986.05	1443.74
-304.8	-302.81	1132.07	887.24	567.69	741.09	304.83	302.81	1132.07	887.24	567.69	741.09
24.1	-1.44	1220.65	911.57	706.53	721.34	24.07	1.44	1220.65	911.57	706.53	721.34
-55.7	-140.55	941.98	572.66	486.98	332.74	55.71	140.55	941.98	572.66	486.98	332.74
-141.5	-100.29	784.63	394.98	360.89	108.65	141.45	100.29	784.63	394.98	360.89	108.65
346.7	284.00	1084.47	694.28	676.24	368.66	346.73	284.00	1084.47	694.28	676.24	368.66
60.1	102.15	847.02	426.43	484.30	61.99	60.15	102.15	847.02	426.43	484.30	61.99
-1220.5	-1115.90	-393.68	-814.86	-734.64	-1211.58	1220.50	1115.90	393.68	814.86	734.64	1211.58
568.0	332.30	791.66	494.08	348.38	95.75	567.97	332.30	791.66	494.08	348.38	95.75
-1395.5	-1589.81	-1255.96	-1573.19	-1683.01	-1974.71	1395.47	1589.81	1255.96	1573.19	1683.01	1974.71

Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e ² PMS N=2	e ² PMS N=3	e ² SES 0.1	e ² SES 0.2	e ² RL	e ² SED	e/Dt PMS N=2	e/Dt PMS N=3	e/Dt SES 0.1	e/Dt SES 0.2	e/Dt RL	e/Dt SED
		5264278.53	5453174.61	1739160.76				0.616	0.627	0.354	
		2645573.58	3324498.25	5335023.95	5629756.97			51.472	57.700	73.094	75.086
64451058.6		70728328.7	70816042.1	58172045.3							
24614745.7	20667681.8		10024095.6		65385217.84	0.810		0.849	0.850	0.770	0.816
24614745.7	20667681.8	5425426.19	10024095.6	4876424.51	12115277.82	687.482	629.955	322.760	438.719	305.995	482.314
23426729.3	10230615.4										
23426729.3	10230615.4	3949410.25	5875056.17	4146527.06	7060999.62	41.641	27.518	17.098	20.853	17.519	22.861
	11154894.9										
3438.85		3616581.12	4211652.95	4353517.66	4698136.20	19.019	1083.209	616.778	665.589	676.705	702.979
978599.08	1013489.63	443211.49	355178.22	955991.16	328802.29	0.943	0.960	0.635	0.568	0.932	0.547
77678.34	20198.73	1962195.38	1634284.34	2946100.56	1286167.93	1.127	0.575	5.665	5.170	6.941	4.586
5191904.03	6217930.13	2012646.90	2744556.44	1052483.72	3690409.88	0.779	0.852	0.485	0.566	0.351	0.656
4541409.62	5338025.17	4277355.07	4480431.15	3535215.10	5947337.31	0.573	0.621	0.556	0.569	0.506	0.656
6342254.61	2230127.41	1108193.27	1490119.11	942658.62	812438.03	3.132	1.857	1.309	1.518	1.208	1.121

4905708.18	5937858.86	2908003.18	3008190.12	2774930.51	1957664.15	48.028	52.839	36.978	37.609	36.122	30.340
179641.76	2314979.16	2495372.52	2051905.70	2715195.80	1116189.16	353.201	1267.921	1316.396	1193.706	1373.154	880.415
165045.83	21361.45	986030.46	514435.07	1336624.18	82714.71	0.945	0.340	2.310	1.668	2.689	0.669
304455.65	369974.82	309441.80	55873.79	571179.46	58548.46	0.719	0.793	0.725	0.308	0.985	0.315
74082887.6 7	77550626.1 5	63008444.8 8	68051482.3 8	59994520.5 7	76769154.02	0.935	0.957	0.862	0.896	0.841	0.952
21333467.4 0	9609621.11	2869724.19	5011184.64	1059821.93	3512009.00	12.560	8.430	4.607	6.087	2.800	5.096
16292524.9 6	7271621.60	1304179.44	1983132.48	340957.95	1264666.32	5.379	3.594	1.522	1.877	0.778	1.499
62312.64	6930670.51	939909.73	1141207.69	214050.18	683619.81	0.309	3.256	1.199	1.321	0.572	1.022
21541124.2 1	22834062.2 5	13984180.7 8	14118541.3 6	17744074.3 2	15853923.11	0.856	0.882	0.690	0.693	0.777	0.735
9147852.29	5001584.36	3861204.41	5403818.78	1113590.43	4812727.14	33.544	24.803	21.793	25.781	11.704	24.330
6868548.96	3888236.24	2972159.74	3294911.92	898370.57	2942002.92	19.461	14.643	12.802	13.479	7.038	12.737
6227.84	3416438.80	2731623.63	2412796.96	972288.64	2084373.78	2.356	55.175	49.336	46.368	29.434	43.097
92923.36	91691.20	1281581.39	787190.86	322267.96	549207.58	0.784	0.779	2.911	2.281	1.460	1.906
579.61	2.07	1489976.40	830966.34	499179.01	520335.99	0.129	0.008	6.523	4.871	3.776	3.855
3103.42	19754.30	887328.78	327938.15	237151.67	110715.38	0.162	0.409	2.740	1.666	1.417	0.968
20008.10	10057.86	615649.22	156006.89	130240.43	11805.09	0.348	0.246	1.928	0.971	0.887	0.267
120218.23	80656.00	1176074.87	482027.02	457306.72	135908.61	12.130	9.936	37.941	24.290	23.659	12.898
3618.02	10434.62	717447.75	181838.56	234547.23	3842.76	0.382	0.648	5.375	2.706	3.073	0.393
1489620.25	1245232.81	154983.48	663996.39	539700.42	1467936.08	0.929	0.850	0.300	0.620	0.559	0.922
322586.13	110423.29	626717.95	244113.94	121368.48	9169.01	3.388	1.982	4.723	2.948	2.078	0.571
1947327.22	2527481.70	1577436.34	2474917.02	2832536.18	3899462.04	0.653	0.744	0.588	0.736	0.788	0.924

	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
ME	265.57	292.48	132.18	79.74	0.00	-31.58
MAD	1849.90	1906.32	1852.07	1887.16	1639.22	1814.72
MSE	7726432.46	7107439.05	6510333.48	6987673.91	5723907.85	7251629.65
MAPE	41.76	110.16	79.08	80.11	80.91	74.69
σ_e	2312.38	2382.90	2315.09	2358.95	2049.03	2268.40

Tabla 44. Cálculo del pronóstico parámetro TTR T5

Datos	TBF (Dt)	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia			
		Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble-Holt		
		PMS N=2	PMS N=3	SES 0.1	SES 0.2	RL	St	Gt	SED
1	1.55			14.79	15.11	11.57	11.36	0.21	
2	10.22			13.46	12.40	11.77	11.30	0.18	11.48
3	2.00	5.88		13.14	11.96	11.98	9.58	-0.01	9.57
4	0.45	6.11	4.59	12.03	9.97	12.19	7.75	-0.19	7.56
5	2.55	1.22	4.22	10.87	8.07	12.40	6.56	-0.29	6.26
6	2.88	1.50	1.67	10.04	6.96	12.61	5.59	-0.36	5.23
7	0.40	2.72	1.96	9.32	6.15	12.81	4.26	-0.46	3.81
8	6.93	1.64	1.94	8.43	5.00	13.02	4.43	-0.39	4.04
9	0.57	3.67	3.41	8.28	5.38	13.23	3.35	-0.46	2.88
10	26.67	3.75	2.63	7.51	4.42	13.44	7.64	0.01	7.65
11	2.05	13.62	11.39	9.42	8.87	13.64	6.53	-0.10	6.43

12	45.23	14.36	9.76	8.69	7.51	13.85	14.19	0.68	14.87
13	0.88	23.64	24.65	12.34	15.05	14.06	12.07	0.40	12.47
14	0.45	23.06	16.06	11.20	12.22	14.27	10.07	0.16	10.22
15	1.02	0.67	15.52	10.12	9.86	14.48	8.38	-0.03	8.36
16	173.45	0.73	0.78	9.21	8.09	14.68	41.37	3.27	44.65
17	42.50	87.23	58.31	25.63	41.17	14.89	44.22	3.23	47.45
18	4.72	107.98	72.32	27.32	41.43	15.10	38.90	2.38	41.28
19	14.33	23.61	73.56	25.06	34.09	15.31	35.89	1.84	37.73
20	1.17	9.53	20.52	23.99	30.14	15.52	30.42	1.11	31.52
21	12.33	7.75	6.74	21.71	24.34	15.72	27.69	0.72	28.41
22	15.50	6.75	9.28	20.77	21.94	15.93	25.83	0.46	26.29
23	14.50	13.92	9.67	20.24	20.65	16.14	23.93	0.23	24.16
24	16.67	15.00	14.11	19.67	19.42	16.35	22.66	0.08	22.74
25	6.25	15.58	15.56	19.37	18.87	16.56	19.44	-0.25	19.19
26	9.62	11.46	12.47	18.06	16.35	16.76	17.28	-0.44	16.84
27	3.05	7.93	10.84	17.21	15.00	16.97	14.08	-0.72	13.36
28	4.00	6.33	6.31	15.80	12.61	17.18	11.49	-0.91	10.58
29	2.42	3.53	5.56	14.62	10.89	17.39	8.95	-1.07	7.88
30	12.00	3.21	3.16	13.40	9.19	17.60	8.71	-0.99	7.72
31	35.42	7.21	6.14	13.26	9.76	17.80	13.26	-0.43	12.83
32	1.47	23.71	16.61	15.47	14.89	18.01	10.55	-0.66	9.90
33	18.22	18.44	16.29	14.07	12.20	18.22	11.56	-0.49	11.07
34		18.44	16.29	14.07	12.20	18.43			9.90
35						18.64			9.24
36						18.84			8.58
37						19.05			7.92
38						19.26			7.26

Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia		Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
		13.24	13.56	10.02				13.24	13.56	10.02	
		3.25	2.18	1.56	1.26			3.25	2.18	1.56	1.26
3.9		11.14	9.96	9.98	7.57	3.88		11.14	9.96	9.98	7.57
5.7	4.14	11.58	9.52	11.74	7.11	5.66	4.14	11.58	9.52	11.74	7.11
-1.3	1.67	8.32	5.52	9.85	3.71	1.33	1.67	8.32	5.52	9.85	3.71
-1.4	-1.22	7.15	4.08	9.72	2.35	1.38	1.22	7.15	4.08	9.72	2.35
2.3	1.56	8.92	5.75	12.41	3.41	2.32	1.56	8.92	5.75	12.41	3.41
-5.3	-4.99	1.50	-1.94	6.09	-2.89	5.29	4.99	1.50	1.94	6.09	2.89
3.1	2.84	7.71	4.82	12.66	2.32	3.10	2.84	7.71	4.82	12.66	2.32
-22.9	-24.03	-19.16	-22.25	-13.23	-19.01	22.92	24.03	19.16	22.25	13.23	19.01
11.6	9.34	7.37	6.82	11.59	4.38	11.57	9.34	7.37	6.82	11.59	4.38
-30.9	-35.47	-36.55	-37.73	-31.38	-30.36	30.88	35.47	36.55	37.73	31.38	30.36
22.8	23.77	11.46	14.17	13.18	11.59	22.76	23.77	11.46	14.17	13.18	11.59
22.6	15.61	10.75	11.77	13.82	9.77	22.61	15.61	10.75	11.77	13.82	9.77
-0.4	14.51	9.10	8.85	13.46	7.34	0.35	14.51	9.10	8.85	13.46	7.34
-172.7	-172.67	-164.24	-165.36	-158.77	-128.80	172.72	172.67	164.24	165.36	158.77	128.80
44.7	15.81	-16.87	-1.33	-27.61	4.95	44.73	15.81	16.87	1.33	27.61	4.95
103.3	67.61	22.60	36.72	10.38	36.56	103.26	67.61	22.60	36.72	10.38	36.56
9.3	59.22	10.73	19.76	0.98	23.40	9.28	59.22	10.73	19.76	0.98	23.40
8.4	19.35	22.82	28.97	14.35	30.36	8.36	19.35	22.82	28.97	14.35	30.36
-4.6	-5.59	9.37	12.01	3.39	16.08	4.58	5.59	9.37	12.01	3.39	16.08
-8.8	-6.22	5.27	6.44	0.43	10.79	8.75	6.22	5.27	6.44	0.43	10.79
-0.6	-4.83	5.74	6.15	1.64	9.66	0.58	4.83	5.74	6.15	1.64	9.66
-1.7	-2.56	3.00	2.76	-0.32	6.08	1.67	2.56	3.00	2.76	0.32	6.08

9.3	9.31	13.12	12.62	10.31	12.94	9.33	9.31	13.12	12.62	10.31	12.94
1.8	2.86	8.44	6.73	7.15	7.22	1.84	2.86	8.44	6.73	7.15	7.22
4.9	7.79	14.16	11.95	13.92	10.31	4.88	7.79	14.16	11.95	13.92	10.31
2.3	2.31	11.80	8.61	13.18	6.58	2.33	2.31	11.80	8.61	13.18	6.58
1.1	3.14	12.20	8.47	14.97	5.46	1.11	3.14	12.20	8.47	14.97	5.46
-8.8	-8.84	1.40	-2.81	5.60	-4.28	8.79	8.84	1.40	2.81	5.60	4.28
-28.2	-29.28	-22.16	-25.66	-17.61	-22.59	28.21	29.28	22.16	25.66	17.61	22.59
22.2	15.14	14.01	13.42	16.54	8.43	22.24	15.14	14.01	13.42	16.54	8.43
0.2	-1.92	-4.15	-6.02	0.00	-7.15	0.22	1.92	4.15	6.02	0.00	7.15

Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
e^2 PMS N=2	e^2 PMS N=3	e^2 SES 0.1	e^2 SES 0.2	e^2 RL	e^2 SED	e/Dt PMS N=2	e/Dt PMS N=3	e/Dt SES 0.1	e/Dt SES 0.2	e/Dt RL	e/Dt SED
		175.26	183.86	100.31				8.541	8.748	6.462	
		10.55	4.76	2.42	1.59			0.318	0.213	0.152	0.123
15.08		124.10	99.23	99.63	57.35	1.942		5.570	4.981	4.991	3.786
32.02	17.13	134.00	90.61	137.81	50.51	12.574	9.198	25.724	21.154	26.088	15.794
1.76	2.80	69.19	30.42	96.97	13.80	0.520	0.656	3.262	2.163	3.862	1.457
1.91	1.48	51.17	16.64	94.52	5.50	0.480	0.422	2.481	1.415	3.372	0.814
5.37	2.44	79.59	33.02	154.09	11.62	5.792	3.903	22.303	14.366	31.033	8.521
28.00	24.89	2.24	3.75	37.06	8.37	0.763	0.720	0.216	0.279	0.878	0.417
9.61	8.06	59.49	23.21	160.34	5.37	5.471	5.010	13.611	8.502	22.345	4.088
525.17	577.60	367.05	494.88	175.02	361.51	0.859	0.901	0.718	0.834	0.496	0.713
133.79	87.21	54.38	46.51	134.44	19.22	5.642	4.556	3.597	3.327	5.656	2.138
953.27	1258.28	1335.66	1423.35	984.73	921.88	0.683	0.784	0.808	0.834	0.694	0.671
517.94	564.85	131.29	200.74	173.65	134.27	25.764	26.906	12.971	16.039	14.918	13.118
511.14	243.53	115.47	138.48	190.96	95.53	50.241	34.679	23.879	26.151	30.708	21.719
0.12	210.41	82.89	78.28	181.17	53.85	0.344	14.268	8.955	8.703	13.239	7.218
29831.05	29813.78	26974.6	27342.36	25206.46	16589.70	0.996	0.995	0.947	0.953	0.915	0.743

2001.07	249.82	284.45	1.78	762.17	24.51	1.053	0.372	0.397	0.031	0.650	0.116
10662.28	4570.51	510.96	1348.06	107.82	1336.97	21.892	14.333	4.792	7.784	2.202	7.752
86.03	3507.27	115.07	390.30	0.95	547.40	0.647	4.132	0.748	1.378	0.068	1.632
69.86	374.42	520.81	839.35	205.91	921.58	7.164	16.586	19.561	24.833	12.300	26.021
21.01	31.30	87.84	144.25	11.50	258.43	0.372	0.454	0.760	0.974	0.275	1.303
76.56	38.72	27.76	41.50	0.19	116.47	0.565	0.401	0.340	0.416	0.028	0.696
0.34	23.36	32.97	37.86	2.69	93.37	0.040	0.333	0.396	0.424	0.113	0.666
2.78	6.53	9.00	7.60	0.10	36.92	0.100	0.153	0.180	0.165	0.019	0.365
87.11	86.59	172.07	159.30	106.21	167.53	1.493	1.489	2.099	2.019	1.649	2.071
3.39	8.15	71.22	45.30	51.08	52.12	0.192	0.297	0.878	0.700	0.743	0.751
23.85	60.75	200.56	142.83	193.82	106.31	1.601	2.556	4.643	3.918	4.565	3.381
5.44	5.32	139.14	74.15	173.71	43.34	0.583	0.576	2.949	2.153	3.295	1.646
1.23	9.85	148.82	71.78	224.13	29.87	0.459	1.299	5.048	3.506	6.195	2.261
77.29	78.22	1.95	7.87	31.31	18.33	0.733	0.737	0.116	0.234	0.466	0.357
795.71	857.19	491.07	658.50	310.22	510.32	0.796	0.827	0.626	0.725	0.497	0.638
494.69	229.35	196.16	180.12	273.73	71.04	15.165	10.326	9.549	9.151	11.281	5.747
0.05	3.71	17.20	36.19	0.00	51.16	0.012	0.106	0.228	0.330	0.000	0.393

	Serie Estacionaria				Serie basada en tendencia	
	Promedio móvil simple		Suavización exponencial simple		Regresión Lineal	Suavización exponencial doble
	e PMS N=2	e PMS N=3	e SES 0.1	e SES 0.2	e RL	e SED
ME	-0.39	-0.89	0.09	0.26	0.00	1.08
MAD	18.77	19.64	16.04	16.20	15.09	14.52
MSE	1565.33	1480.57	993.76	1042.33	920.76	709.87
MAPE	5.32	5.27	5.67	5.38	6.37	4.28