



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

### **ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN HYUNDAI H21/32 DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA QUEVEDO II**

**EDWIN OSWALDO TACO TENELANDA**

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGÍSTER EN GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

Riobamba – Ecuador

Agosto 2022

**©2022, Edwin Oswaldo Taco Tenelanda**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN HYUNDAI H21/32 DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA QUEVEDO II, de responsabilidad del señor Edwin Oswaldo Taco Tenelanda ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Ing. Ángel Geovanny Guamán Lozano; Mag  
PRESIDENTE



Firmado electrónicamente por:  
**ANGEL GEOVANNY  
GUAMAN LOZANO**

---

Ing. Marco Heriberto Santillán Gallegos; M.Sc  
DIRECTOR



Firmado electrónicamente por:  
**MARCO HERIBERTO  
SANTILLAN  
GALLEGOS**

---

Ing. Jorge Mauricio Néjer Guerrero; Mag  
MIEMBRO



Firmado electrónicamente por:  
**JORGE MAURICIO  
NEJER GUERRERO**

---

Ing. Carlos José Santillán Mariño; M.Sc  
MIEMBRO



Firmado electrónicamente por:  
**CARLOS JOSE  
SANTILLAN  
MARINO**

---

Riobamba, agosto 2022

## **DERECHOS INTELECTUALES**

Yo, Edwin Oswaldo Taco Tenelanda, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el presente Proyecto de Investigación, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Firmado electrónicamente por:  
**EDWIN OSWALDO  
TACO TENELANDA**

---

Edwin Oswaldo Taco Tenelanda

CC. 060292120-7

## **DEDICATORIA**

A Dios, verdadera fuente de amor y sabiduría. Con todo mi cariño y mi amor a mis padres Eduardo Ángel y Teresa Piedad, porque gracias a ellos sé que la responsabilidad se la debe vivir como un compromiso de dedicación y esfuerzo, me han mostrado que en el camino hacia la meta se necesita de fortaleza para aceptar las derrotas y de coraje para salir de ellas.

*“El éxito es la suma de pequeños esfuerzos que se repiten cada día, la preparación es la clave.”*

Edwin Oswaldo.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, y a mis estimados maestros que, a lo largo de mi carrera, me han transmitido sus amplios conocimientos y sus sabios consejos; especialmente a mi director y miembros de tribunal que muy acertadamente me dirigieron en este proyecto de investigación con su experiencia, su paciencia y sus consejos han logrado en mí que pueda terminar mi estudio de maestría con éxito.

*“El poder radica en uno mismo, la dificultad es saber encontrarlo, lo sublime del poder depende de las virtudes de quien lo tenga para ser exitoso en la vida profesional”*

Edwin Oswaldo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>SUMMARY</b> .....	xiii
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Planteamiento y formulación del problema de investigación.....	2
1.3 Sistematización del problema de investigación.....	2
1.4 Justificación .....	3
1.5 Objetivos.....	3
1.5.1 <i>Objetivo general</i> .....	3
1.5.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.6 Hipótesis .....	4
1.6.1 Variable dependiente.....	4
1.6.2 Variable independiente.....	4
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>5</b>
<b>1. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>5</b>
2.1 Fundamentos .....	5
2.2 Confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad .....	5
2.2.1 <i>Confiabilidad</i> .....	5
2.2.2 <i>Disponibilidad</i> .....	7
2.2.3 <i>Mantenibilidad</i> .....	8
2.3 Tipos de Mantenimiento .....	9
2.3.1 <i>Mantenimiento preventivo</i> .....	9
2.3.2 <i>Mantenimiento correctivo</i> .....	10
2.3.3 <i>Mantenimiento predictivo</i> .....	10
2.3.4 <i>Mantenimiento Centrado en Confiabilidad</i> .....	12
2.4 Análisis basado en confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.....	13
2.4.1 <i>Tiempo medio entre fallos</i> .....	13
2.4.2 <i>Tiempo medio hasta el fallo</i> .....	14
2.4.3 <i>Tiempo medio de reparación</i> .....	15
2.4.4 <i>Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM/RAM)</i> .....	15
2.5 Modelo de distribución de fallas .....	15
2.5.1 <i>Distribución normal</i> .....	16
2.5.2 <i>Distribución exponencial</i> .....	16
2.5.3 <i>Distribución de Weibull</i> .....	17
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>18</b>
<b>3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>18</b>

3.1	Descripción de la Central Termoeléctrica Quevedo II.....	18
3.2	Diagrama funcional del proceso de generación eléctrica.....	18
3.3	Características de las unidades de generación.....	20
3.4.1	Recolección y selección de datos.....	22
	<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>24</b>
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24
4.1	Análisis RAM en las unidades de generación.....	24
4.1.1	<i>Disponibilidad</i> .....	25
4.1.2	<i>Confiabilidad</i> .....	27
4.1.3	<i>Mantenibilidad</i> .....	29
4.2	Análisis con el método de distribuciones.....	30
4.3	Análisis.....	34
4.3.1	<i>Análisis de costos</i> .....	36
4.3.2	<i>Servicio especializado para mantenimientos programados.</i> .....	37
	<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>39</b>
5	PROPUESTA.....	39
5.1	Evaluación del caso de estudio.....	39
5.2	Estrategias y acciones de mantenimiento para mejorar los indicadores de disponibilidad y confiabilidad.....	41
5.2.1	<i>Diagnóstico integral</i> .....	41
5.2.2	<i>Taller para reacondicionamiento de partes de motores de combustión interna</i> .....	43
5.2.3	<i>Gestión en la compra de equipos</i> .....	44
5.3	Beneficios / reducción de costos para CELEC EP.....	44
5.4	Índices de mantenimiento 2017.....	46
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>51</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-3.</b>	Datos técnicos del motor Hyundai.....	20
<b>Tabla 1-4.</b>	Resultados del análisis RAM .....	24
<b>Tabla 2-4.</b>	Seguimiento anual de la disponibilidad 2013 .....	25
<b>Tabla 3-4.</b>	Seguimiento anual de la disponibilidad 2014 .....	25
<b>Tabla 4-4.</b>	Seguimiento anual de la disponibilidad 2015 .....	26
<b>Tabla 5-4.</b>	Seguimiento anual de la disponibilidad 2016 .....	26
<b>Tabla 6-4.</b>	Seguimiento anual de la confiabilidad año 2013.....	27
<b>Tabla 7-4.</b>	Seguimiento anual de la confiabilidad año 2014.....	27
<b>Tabla 8-4.</b>	Seguimiento anual de la confiabilidad año 2015.....	28
<b>Tabla 9-4.</b>	Seguimiento anual de la confiabilidad año 2016.....	28
<b>Tabla 10-4.</b>	Horas de trabajo del motor, periodo 2012-2016.....	29
<b>Tabla 11-4.</b>	Valores de ajuste de las distribuciones sobre los datos históricos de mantenimiento .....	31
<b>Tabla 12-4.</b>	Ciclos de mantenimiento realizados .....	36
<b>Tabla 13-4.</b>	Personal técnico especializado para mantenimiento parcial y overhaul .....	37
<b>Tabla 14-4.</b>	Costos de repuestos de acuerdo con el ciclo de mantenimiento.....	38
<b>Tabla 15-4.</b>	Personal técnico especializado para mantenimiento parcial y overhaul incluye el reacondicionamiento de repuestos .....	38
<b>Tabla 1-5.</b>	Fallas frecuentes en la unidad evaluada.....	40
<b>Tabla 2-5.</b>	Costo de actividades de reacondicionamiento de partes que se realizan en el taller por mantenimientos .....	45
<b>Tabla 3-5.</b>	Valores de disponibilidad año 2016-2017.....	46
<b>Tabla 4-5.</b>	Valores de confiabilidad año 2016-2017 .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1.</b>	Ubicación de la Central Termoeléctrica Quevedo II.....	1
<b>Figura 2-2.</b>	Curva de bañera para relacionar la tasa de fallos a través del tiempo.....	6
<b>Figura 3-2.</b>	Tiempo medio entre falla y tiempo medio para el ciclo de reparación. ....	14
<b>Figura 1-3.</b>	Central Termoeléctrica Quevedo II.....	18
<b>Figura 2-3.</b>	Esquema de funcionamiento de una central de generación termoeléctrica .....	19
<b>Figura 3-3.</b>	Generación de energía eléctrica en función de la fuente utilizada, periodo 2000-2018. ....	19
<b>Figura 4-3.</b>	Unidad de generación: (a) Motor Hyundai H21/32P, (b) esquema de funcionamiento. ....	20
<b>Figura 5-3.</b>	Dimensiones del Motor Hyundai H21/32.....	21
<b>Figura 6-3.</b>	(a) Distribución de las unidades de generación, (b) Motor MDU60 – objeto de estudio.....	22
<b>Figura 1-4.</b>	Representación del porcentaje de operatividad de la unidad 60 .....	30
<b>Figura 2-4.</b>	Ajuste de la función que mejor se ajusta a los datos del tiempo entre fallos (TEF) .....	31
<b>Figura 3-4.</b>	Valores de la distribución de Weibull.....	33
<b>Figura 4-4.</b>	Función de distribución de probabilidad Weibull de Confiabilidad .....	34
<b>Figura 5-4.</b>	Función de distribución de probabilidad Weibull de Mantenibilidad.....	34
<b>Figura 6-4.</b>	Confiabilidad - Probabilidad de falla cada 2200 horas (95%).....	35
<b>Figura 7-4.</b>	Probabilidad de falla en MTBF (59.54%).....	35
<b>Figura 8-4.</b>	Mantenibilidad en MTBF (60 %) .....	36
<b>Figura 1-5.</b>	Diagrama de la Central Termoeléctrica Quevedo II .....	39
<b>Figura 2-5.</b>	Equipo de balanceo dinámico.....	44
<b>Figura 3-5.</b>	Costos de mantenimiento .....	45
<b>Figura 4-5.</b>	Indicadores de disponibilidad – periodo 2016-2017 .....	47
<b>Figura 5-5.</b>	Indicadores de confiabilidad – periodo 2016- 2017.....	48
<b>Figura 6-5.</b>	Indicadores de disponibilidad – periodo 2017.....	48
<b>Figura 7-5.</b>	Indicadores de confiabilidad – periodo 2017.....	48

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A REGISTRO DE FALLAS

Anexo B RESULTADOS RAM

Anexo C RESULTADOS ESTADÍSTICOS MINITAB

Anexo D INDICADORES DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD OCT 2016

Anexo E INDICADORES DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD PERIODO 2017 EN  
LA PÁGINA GPR (GOBIERNO POR RESULTADOS)

## RESUMEN

El objetivo fue analizar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de las unidades de generación Hyundai H21/32 de la Central Termoeléctrica Quevedo II. Resulta imperativo definir y medir los índices de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM) de los motores Hyundai H21/32, parte fundamental para la generación de energía eléctrica en la Central Termoeléctrica Quevedo II. Aunque en Ecuador se ha priorizado a la producción hidroeléctrica, es necesario diversificar la matriz de generación y en ese sentido la generación termoeléctrica representa una gran oportunidad de mejora. Para determinar los índices de CDM, se ha empleado los registros históricos de mantenimiento con datos desde el 2012 hasta el 2016, además se empleó un enfoque estadístico a través de la distribución de Weibull para conocer la probabilidad de falla. Como caso de estudio se analizó el motor N. 60 ya que es el que presenta mayor tasa de fallos. Se calculó un tiempo medio entre fallos de 662 horas y un tiempo medio de reparación de 140 horas, con lo que se obtiene una confiabilidad superior al 93 %, disponibilidad alrededor de 83 % y mantenibilidad de 26.48 %, esto aplicando el estándar IEC 61703. Gracias al análisis desarrollado se implementó un taller de máquinas herramientas para la reparación y reacondicionamiento de partes de motores, que representa un papel importante dentro de la gestión del mantenimiento ya que permite determinar el flujo de trabajo a realizarse en las unidades de generación, así como un equipo de balanceo dinámico para atender al elemento de mayor criticidad, el turbocargador. Finalmente, se capacitó al personal de mantenimiento sobre la importancia de llevar a cabo las tareas de mantenimiento de acuerdo con el calendario de mantenimiento entregado por el fabricante.

**Palabras clave:** <CONFIABILIDAD>, <DISPONIBILIDAD>, <MANTENIBILIDAD>, <DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL>, <FALLA>, <TERMOELÉCTRICA>, <MOTOR>.



Firmado electrónicamente por:  
**LUIS ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS**



27-07-2022  
0088-DBRA-UPT-IPEC-2022

## SUMMARY

The objective was to analyze the reliability, availability and maintainability of the Hyundai H21/32 generation units of the Thermoelectric Power Plant Quevedo II. It is imperative to define and measure the reliability, availability and maintainability indexes (CDM) of the Hyundai H21/32 engines, a fundamental part for the generation of electric energy in the Thermoelectric Power Plant Quevedo II. Although hydroelectric production has been prioritized in Ecuador, it is necessary to diversify the generation matrix and in this sense thermoelectric generation represents a great opportunity for improvement. To determine the CDM indexes, historical maintenance records with data from 2012 to 2016 have been used, in addition, a statistical approach was used through the Weibull distribution to know the probability of failure. As a case study, the N. 60 engine was analyzed since it is the one with the highest failure rate. An average time between failures of 662 hours and an average repair time of 140 hours was calculated, resulting in a reliability of more than 93 %, availability of around 83 % and maintainability of 26.48 %, applying the IEC 61703 standard. Thanks to the analysis developed, a machine tool workshop was implemented for the repair and reconditioning of engine parts, which plays an important role in maintenance management since it allows determining the work flow to be carried out in the generation units, as well as a dynamic balancing equipment to address the most critical element, the turbocharger. Finally, maintenance personnel were trained on the importance of carrying out maintenance tasks in accordance with the maintenance schedule provided by the manufacturer.

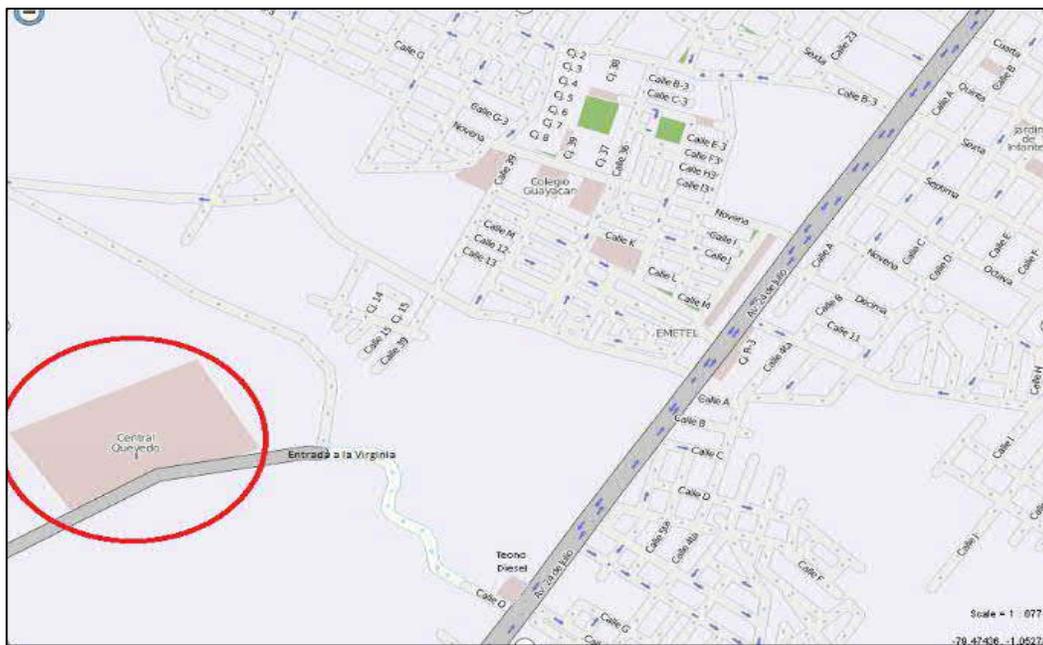
**Key words:** <RELIABILITY>, <AVAILABILITY>, <MAINTAINABILITY>, <WEIBULL DISTRIBUTION>, <FAILURE>, <THERMOELECTRIC>, <ENGINE>.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

La Central Termoeléctrica Quevedo II está ubicada en el kilómetro 4.5 de la vía principal Quevedo – El Empalme (Provincia de los Ríos), es una empresa del estado dedicada a la generación eléctrica por motores de combustión interna que consume bunker N.06. La misma pertenece a la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, la cual delego a la Unidad de Negocio TERMOPICHINCHA la administración, operación y mantenimiento de la central en el mes de abril del 2011 cuando arrancó la operación comercial, con una potencia nominal de 102 MW.



**Figura 1-1.** Ubicación de la Central Termoeléctrica Quevedo II

Fuente: Google maps

La central está integrada de 60 unidades de generación con motores de combustión interna marca Hyundai de 1.7 MW cada uno. La tensión es elevada de 34500 (V) a 230000 (V) mediante un gran transformador “SHENDA”, este voltaje es el requerido para ser integrado al Sistema Nacional Interconectado (SIN).

Durante el desarrollo de esta investigación, se analiza el comportamiento de las unidades de generación eléctrica, utilizando las teorías del análisis de la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM), con el objetivo de plantear estrategias y acciones futuras de mantenimiento para cada uno de los componentes que integran la unidad de generación.

Con este fin se aplica conceptos de CDM, que son de naturaleza probabilística que tienen como parte fundamental concluir de manera cuantitativa acerca de los posibles desenlaces de un evento en forma de pronósticos o predicciones. Los cuales se fundamenta en el análisis estadístico de la información histórica disponible de los eventos, como son las intervenciones de mantenimiento en las unidades de generación analizadas.

## **1.2 Planteamiento y formulación del problema de investigación**

En la Central Termoeléctrica Quevedo II, que genera energía para el SNI, las unidades de generación son esenciales, por lo que es importante realizar un análisis de CDM. La central cuenta con 60 unidades de generación que funcionan a revoluciones medias de 900 revoluciones por minuto (RPM), cada una está compuesta por un motor de combustión interna y un generador eléctrico. Dentro del proceso de producción de la energía eléctrica el motor de combustión es un componente fundamental su función principal es la de hacer girar al rotor del generador a la velocidad establecida del fabricante, este giro se realiza mediante acople directo.

Sin embargo, actualmente la operación y mantenimiento de las unidades estudiadas no se realiza de manera efectiva, debido a la complejidad y técnicas de mantenimiento sobre diversos patrones de falla, ya que estas unidades (Hyundai H21/32) son las primeras que se instalaron en el país para la generación termoeléctrica. Obteniendo como consecuencia fallas inesperadas en los motores, que impactan de manera directa la disponibilidad, ya que los mismos requieren de una planificación adecuada en las estrategias del mantenimiento que se realizan para mantener operativos a su máxima capacidad de funcionamiento.

## **1.3 Sistematización del problema de investigación**

Este estudio parte en el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, ya que permite pronosticar; para un periodo determinado de tiempo la disponibilidad y en base a los resultados poder establecer estrategias, actividades en las tareas de mantenimiento que se deben realizar en la planificación anual de las unidades.

## **1.4 Justificación**

Conscientes de la importancia del medio ambiente y con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes, se requiere que las centrales termoeléctricas existentes, operen al máximo rendimiento, y que además se realice una buena gestión del mantenimiento; siendo el objetivo de este desarrollar actividades productivas de manera eficiente, dando como resultado mejores índices económicos, ambientales que permitan mantener su sostenibilidad en el futuro.

Disponibilidad y confiabilidad son términos que forman parte de la cotidianidad actual de un proceso de generación de energía eléctrica. Para ello debemos garantizar la disponibilidad de funcionamiento de las unidades e instalaciones de tal modo que permitan atender el proceso de producción. En la actualidad las centrales térmicas se encuentran inmersas en el mejoramiento y optimización de los índices, a partir de la introducción de nuevas técnicas de mantenimiento y de diagnóstico.

Por lo expuesto, se puede manifestar que este trabajo reviste de gran importancia, mismo que se encuentra enmarcado en el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de las unidades de generación, y de esta manera establecer estrategias y acciones de mantenimiento, aplicando técnicas de diagnóstico integral, utilizando herramientas como el análisis causa raíz, análisis de modos de fallo, mantenimiento basado en condición, mantenimiento programado y otras.

## **1.5 Objetivos**

### ***1.5.1 Objetivo general***

Analizar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de las unidades de generación Hyundai H21/32 de la Central Termoeléctrica Quevedo II.

### ***1.5.2 Objetivos específicos***

Desarrollar los conceptos, tipos y aplicaciones de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad en sistemas de generación termoeléctrica.

Describir el proceso de generación eléctrica, con el fin de identificar sus parámetros técnicos y operacionales.

Analizar los valores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad mediante su valoración con el método de distribución.

Plantear estrategias y acciones de mantenimiento a partir de la interpretación de los parámetros y de las curvas CDM, para alcanzar un nivel de mantenimiento efectivo.

## **1.6 Hipótesis**

Las estrategias de mantenimiento aplicadas a las unidades de generación Hyundai de la Central Termoeléctrica Quevedo II, incrementan los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

### **1.6.1 Variable dependiente**

Los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

### **1.6.2 Variable independiente**

Las estrategias de mantenimiento aplicadas a las unidades de generación Hyundai de la Central Termoeléctrica Quevedo II.

## CAPÍTULO II

### 1. ESTADO DEL ARTE

#### 2.1 Fundamentos

La confiabilidad se refiere a las prácticas implementadas para extender proactivamente la vida útil de un activo, se define como la finalización de un sistema o componentes del sistema dentro del tiempo especificado y bajo las condiciones especificadas sin fallas. Un sistema o componente del sistema debe operar activamente dentro de la vida útil del fabricante. Los períodos de garantía y las condiciones de garantía los determinan los fabricantes de máquinas en función de la experiencia adquirida como resultado de las pruebas posteriores a la producción y la experiencia de producciones anteriores. Las condiciones en las que funciona un sistema o máquina y el nivel de conocimientos y habilidades del personal operativo son los factores que afectan directamente la vida útil de un elemento de máquina.

#### 2.2 Confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad

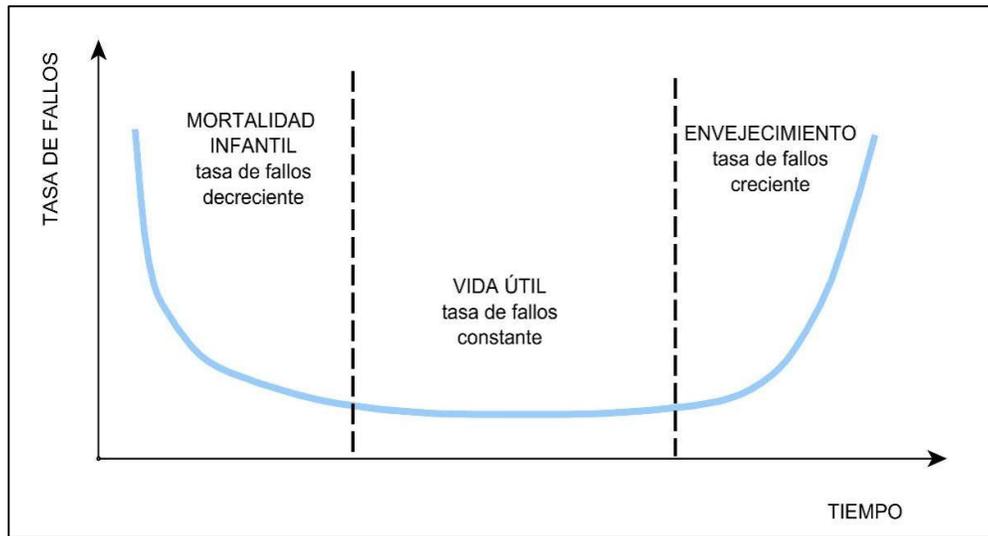
##### 2.2.1 *Confiabilidad*

El ciclo de vida de un sistema se describe mediante la curva de bañera en ingeniería de confiabilidad (Figura 1-2). La curva de la bañera maneja el ciclo de vida en tres etapas. La primera etapa es la etapa temprana, donde los errores y fallas de producción son altos; la segunda etapa representa la vida útil en donde las tasas de falla tienen un valor constante bajo; la tercera etapa constituye el envejecimiento, donde las tasas de fallas y errores comienzan a aumentar debido al desgaste de sus componentes.

La tasa de fallas de los equipos en la etapa inicial o en la etapa de envejecimiento siempre es alta. Un equipo recién fabricado tendrá muchas fallas por problemas de fabricación. La tasa de fallas se reducirá con el mantenimiento adecuado y el conocimiento del sistema.

En la primera etapa del ciclo de vida, desde la configuración inicial del sistema hasta el tiempo de condición normal, la probabilidad de falla comienza en un nivel proporcionalmente alto y disminuye gradualmente con el ciclo de vida. En el período de vida útil se tiene una tasa de degradación casi constante. En este período, el hardware tiene la mayor eficiencia operativa. En

la última etapa del envejecimiento, la tasa de deterioro muestra una tasa de desgaste que cambia rápidamente (Barberá et al, 2012). El primer deterioro resulta de fallas en el diseño y la fabricación. Para evitar este tipo de mal funcionamiento, se deben realizar pruebas inicialmente y se deben tomar las precauciones necesarias. Este tiempo suele ser relativamente corto para los sistemas mecánicos.



**Figura 2-2.** Curva de bañera para relacionar la tasa de fallos a través del tiempo

Fuente: (Carnero, 2006)

Las fallas en el período de vida útil, donde ocurren fallas aleatorias, a menudo son causadas por fallas operativas. En este sentido, cobra importancia la formación de los operadores de máquinas.

Las fallas que se observan durante el período de desgaste son causadas por la finalización de la vida útil de partes y subsistemas que conforman el motor y, en este caso, la vida útil debe extenderse con mantenimiento preventivo y productivo (Hipkin, 2000).

Entender el comportamiento en cada etapa es de vital importancia para entender las acciones que se deben seguir en cada etapa de la vida útil de un elemento de máquina. En la primera etapa, el desempeño del motor va a depender de la velocidad con la que el personal operativo conozca la máquina y en la etapa final dependerá del ciclo de vida de cada elemento. Por tanto, las acciones necesarias del equipo de mantenimiento en la etapa intermedia se deben realizar una planificación para maximizar la operatividad de los motores y asegurar el máximo rendimiento de la central termoeléctrica. En ese sentido, a continuación, se describe los conceptos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para proporcionar un estudio adecuado sobre el ciclo de vida de los motores Hyundai H21/32.

La confiabilidad ( $R$ ) en un tiempo ( $t$ ) dado, es la probabilidad de que el sistema falle en  $t$ . Sea  $T$  la variable aleatoria tiempo hasta la falla (Kennedy et al, 2005), se determina de acuerdo con la norma IEC 60300-3-5, IEC 60300-3-11 y IEC 61703.

$$R(t) = P(T > t) = 1 - p(T < t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (1)$$

Donde  $f(t)$  es la función de densidad de probabilidad y  $F(t)$  es la función de distribución acumulativa, una solución exacta se representa mediante la ecuación (2.2):

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad (2)$$

Donde  $R(t)$  representa la probabilidad de funcionamiento libre de fallas,  $e$  se conoce como el número de Euler ( $e = 2.718$ ),  $\lambda$  la tasa de fallo y  $t$  es el tiempo libre de fallos.  $MTBF$  se define como el tiempo medio entre fallas y es inversamente proporcional a  $\lambda$ .

### 2.2.2 Disponibilidad

La disponibilidad se define como el grado en que el sistema o los componentes del sistema son operativos para realizar sus tareas de manera óptima en un momento desconocido. Esto significa que un equipo debe estar disponible durante el período de espera para la operación. La medida en que puede realizar su tarea en caso de necesidad se explica con la disponibilidad ( $A$ ).

$$A(t) = P[X(t) = 1], t > 0 \quad (3)$$

La disponibilidad y la confiabilidad son dos criterios diferentes. Confiabilidad significa que un sistema en uso completa su tarea antes de que ocurra una falla dentro de un período de tiempo específico, y la disponibilidad significa que está disponible antes de comenzar a trabajar.

El período requerido para reparar las fallas y realizar el mantenimiento impide que el sistema se encuentre en la condición de disponibilidad. Suponiendo que el mantenimiento se realiza a un ritmo constante, se puede expresar de la siguiente manera en un estado estacionario después de que una conducta temporal tenga accesibilidad fija (Barberá et al, 2012).

Para piezas reparables, la disponibilidad se define como:

$$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (4)$$

Donde  $MTBF$  se define como el tiempo medio entre fallas y  $MTTR$  representa el tiempo medio de reparación.

### 2.2.3 *Mantenibilidad*

El análisis de mantenibilidad se utiliza para evaluar el diseño y la operación del sistema o los componentes del sistema en términos de procedimientos de mantenimiento y recursos necesarios. Los principales intervalos de tiempo que se deben considerar al realizar el análisis de mantenibilidad son los siguientes:

Diagnósticos, tiempos de suministro de repuestos, retrasos administrativos, desmontaje/reemplazo, tiempo de reparación, montaje y prueba del correcto funcionamiento del sistema después de la reparación.

El mantenimiento es la operación realizada en los intervalos especificados para mantener el sistema o componente del sistema relevante (motor) en condiciones óptimas para su funcionamiento. Una reparación es un trabajo realizado de acuerdo con los procedimientos recomendados por el fabricante para devolver un sistema o componente del sistema que no ha podido volver a las condiciones normales de funcionamiento.

Las operaciones de mantenimiento y reparación requieren diferentes niveles de experiencia y habilidades para cada sistema o componente del sistema. Los períodos necesarios para las operaciones de mantenimiento y reparación varían según la competencia del personal que realiza el trabajo. Por esta razón, uno de los trabajos que se debe realizar antes de determinar el tiempo requerido para el mantenimiento y reparación es determinar el nivel de competencia del personal para realizar el trabajo.

En el análisis de mantenibilidad, el tiempo requerido para el mantenimiento se determina como el "tiempo medio de reparación" (MTTR).

La mantenibilidad ( $M$ ) de un sistema se calcula de la siguiente manera (Barberá et al, 2012):

$$M(t) = P(T \leq t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (5)$$

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-\frac{t}{MTTF}} \quad (6)$$

Donde  $\mu$  representa la tasa de reparación y se calcula como el inverso de  $MTTF$ .

Los enfoques de mantenimiento más utilizados se describen en la siguiente sección.

## **2.3 Tipos de Mantenimiento**

### **2.3.1 *Mantenimiento preventivo***

El trabajo de mantenimiento preventivo es el mantenimiento recomendado por el fabricante a intervalos regulares para garantizar que el sistema y los componentes del sistema continúen funcionando en condiciones normales de funcionamiento. En el mantenimiento preventivo realizado dentro de los plazos especificados, las partes del sistema desmontadas se reemplazan por otras nuevas si están fuera de las condiciones especificadas por el fabricante. El objetivo de los trabajos de mantenimiento preventivo es inspeccionar los sistemas antes de que fallen y minimizar la posibilidad de mal funcionamiento que pueda ocurrir en el desempeño de sus funciones.

Los trabajos de mantenimiento preventivo ocupan un lugar importante en las centrales de generación termoeléctrica. Estos mantenimientos deben llevarse a cabo meticulosamente para que las unidades de generación puedan continuar su operación sin interrupción. Los trabajos de mantenimiento preventivo oportunos y óptimos afectan directamente la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas. El mantenimiento preventivo debe realizarse con los materiales y la competencia adecuados para garantizar el funcionamiento más preciso de un sistema en el momento deseado o para evitar interrupciones durante el trabajo.

Las características más efectivas del sistema en las que se puede aplicar el mantenimiento preventivo son las siguientes:

- El componente del sistema a mantener debe ser crítico
- Componente del sistema debe tener fallas recurrentes
- Tienen tasas reducidas de confiabilidad y mantenibilidad

El propósito del mantenimiento preventivo es reducir la mayor tasa de fallas a niveles bajos. Es uno de los métodos de mantenimiento más efectivos para reducir las tasas de falla. El mantenimiento preventivo varía según la competencia del personal de mantenimiento y el tiempo de mantenimiento.

### **2.3.2 *Mantenimiento correctivo***

El trabajo de mantenimiento correctivo se realiza de la manera más rápida y conveniente para eliminar las fallas que ocurren en condiciones normales de funcionamiento del sistema y los componentes del sistema. Se realiza fuera de los intervalos de mantenimiento especificados por el fabricante. En el mantenimiento correctivo, los componentes del sistema desmontados se restauran a las condiciones normales de funcionamiento siguiendo los procedimientos recomendados por el fabricante.

Los motores Hyundai H21/32 tienen una copia de seguridad de casi todos los sistemas. Los sistemas de repuesto se equipan mientras se repara el motor para evitar la interrupción del funcionamiento de la central. Para realizar el mantenimiento correctivo en caso de mal funcionamiento, se debe contar con repuestos adecuados, personal competente y el estado operativo actual de la central.

Después del trabajo de mantenimiento correctivo, los períodos de mantenimiento del sistema o componente del sistema relevante deben actualizarse como trabajo de mantenimiento preventivo y el próximo tiempo de mantenimiento debe determinarse como trabajo de mantenimiento correctivo que también incluye el trabajo de mantenimiento preventivo. Los correctos y oportunos trabajos de mantenimiento correctivo inciden directamente en la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas.

### **2.3.3 *Mantenimiento predictivo***

EL mantenimiento predictivo consiste en monitorear si la maquinaria y el motor están operando en condiciones normales mediante mediciones y controles periódicos, evaluar los resultados obtenidos al medir y verificar si existe la posibilidad de falla, y si tal posibilidad existe, planificar y realizar las actividades de mantenimiento y reparación necesarias en un momento apropiado.

Se ha demostrado que el mantenimiento predictivo aumenta significativamente la seguridad del sistema (Zhou et al, 2007); (Billinton y Allan, 1988). Se puede hacer otra definición de mantenimiento predictivo para detectar, analizar y corregir fallas en maquinaria y equipos antes de que se vuelvan problemáticos, y para medir parámetros seleccionados y compararlos con valores límites predeterminados utilizando gradientes gráficos. El enfoque utilizado es predecir el estado futuro de la maquinaria y el equipo mediante el seguimiento del estado actual y pasado (Swanson, 2001).

El principio fundamental de este sistema de mantenimiento es examinar el rendimiento de las máquinas y decidir cuándo necesitarán mantenimiento. La interrupción de la producción se interrumpe por un breve tiempo y se repara la falla predeterminada.

El mantenimiento predictivo consiste en realizar mediciones periódicas y abordar los parámetros del proceso o de la máquina para predecirlos antes de que ocurran fallas. El mantenimiento predictivo es la base de un buen programa de confiabilidad. En lugar de mantenimiento preventivo, como la lubricación que previene un mal funcionamiento, las actividades de mantenimiento predictivo se enfocan en anticipar y predecir las operaciones potenciales de la maquinaria.

Cuando se predice una falla potencial, se da prioridad a la acción correctiva para el motor con mal funcionamiento (Mokashi, 2002); (Hipkin, 2000). En este enfoque de mantenimiento, se deben verificar y medir algunos parámetros relacionados con los motores. A través de estas mediciones y controles, se pueden formar pensamientos sobre las condiciones de trabajo de la máquina y así se pueden determinar las causas de la falla y/o daño. Como la causa de la falla es cierta, se proporcionan las piezas de repuesto y el equipo necesarios y se detiene la producción a corto plazo y se elimina la falla.

El mantenimiento predictivo es la realización de esta actividad en el momento más adecuado mediante la determinación de los requerimientos de mantenimiento-reparación de maquinaria, repuestos y equipos con observación periódica y sistemas de monitoreo de condición realizados mediante el uso de dispositivos especiales cuando sea necesario. Por lo tanto, causan menos tiempo de inactividad, mano de obra y gastos de material y la vida útil de las piezas se utiliza por más tiempo (Swanson, 2001).

Dado que la causa del mal funcionamiento ya se ha detectado en este sistema, no se pierde tiempo para encontrar el mal funcionamiento después de que comience el mantenimiento y se pueden proporcionar piezas de repuesto por adelantado y se acorta el período de mantenimiento. Nuevamente, este sistema también puede prevenir daños secundarios, ya que el equipo recibe un servicio completo antes de la falla. Por ejemplo, en caso de falla de cualquier rodamiento, el rodamiento se puede cambiar por un corto tiempo antes de que el rodamiento se desplace, el rodamiento puede dañarse como resultado de la distribución de piezas, como el daño del eje puede evitarse, de modo que las piezas se utilizan de manera más eficiente.

Las aplicaciones de mantenimiento predictivo tienen muchos beneficios en términos de sistema y componentes del sistema. El mantenimiento predictivo ayuda a prevenir fallas que pueden ocurrir

en momentos inesperados. Aumenta el período de funcionamiento normal entre las dos fallas y, por lo tanto, reduce los costos de mantenimiento. El mantenimiento predictivo reduce el tiempo de mantenimiento y extiende la vida útil del sistema y los componentes del sistema. Contribuye a aumentar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de los sistemas (Cha et al, 2004); (Carnero, 2006).

#### **2.3.4 *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad***

En las últimas dos décadas, la atención ha cambiado considerablemente en comparación con otras disciplinas de gestión. Este cambio se debe al gran aumento en la cantidad y variedad de activos físicos, como fábricas, equipos y edificios, que deben mantenerse en todo el mundo. Se requirieron nuevas técnicas de mantenimiento, cambios en las organizaciones de mantenimiento y responsabilidades para el mantenimiento de estos activos, que tienen diseños más complejos que antes. Además, la atención debe responder a las expectativas cambiantes, es decir ser flexible y adaptarse a los requerimientos de producción. Mayor conciencia de qué fallas en los equipos afecta más la seguridad y el medio ambiente, el vínculo entre el mantenimiento y la calidad del producto, y la reducción de costos al aumentar el uso de la fábrica y/o taller.

Estos cambios ponen a prueba los límites de las habilidades y el comportamiento en todas las áreas de la industria. Los encargados de mantenimiento, al igual que los ingenieros y los gerentes, han adoptado nuevas adaptaciones de pensamiento y comportamiento. Al mismo tiempo, las limitaciones en los sistemas de mantenimiento se han vuelto cada vez más evidentes, a pesar del uso generalizado de computadoras y sistemas inteligentes.

En tal entorno, los gerentes y jefes de planta han buscado nuevos enfoques de mantenimiento. Constantemente buscan evitar un mal comienzo y cuellos de botella que causan una gran confusión y disminuyen la productividad. Uno de los marcos estratégicos desarrollados para este propósito es la “atención centrada en la confiabilidad”. Si se aplica correctamente, la atención centrada en la confiabilidad puede cambiar la relación comercial entre los activos físicos y quienes los usan y cuidan. También pone en servicio nuevos activos de forma más rápida y fiable (Kennedy et al, 2005); (Rausand, 1998).

La definición de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) debe considerarse junto con la definición del concepto de mantenimiento. Mantenimiento significa asegurar y mantener el trabajo que deben hacer los activos físicos. A la luz de esta definición, RCM es el proceso que permite determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier entidad física dentro de su propio sistema operativo (Maubray, 2001).

RCM es la metodología en la que la funcionalidad del equipo, el análisis de modos y efectos de falla y la evaluación de los resultados de falla determinan las operaciones de mantenimiento requeridas y los intervalos de tiempo para estas operaciones (Hipkin y De Cock, 2000).

El proceso RCM requiere el análisis de modos y efectos de falla (FMEA) con un enfoque de ingeniería. FMEA es un método para prevenir defectos y problemas existentes en productos y procesos. Este método es un enfoque sistemático para determinar el efecto de las fallas y los pasos para prevenirlas en términos de funcionalidad y confiabilidad del proceso. Es un método destinado a analizar y evaluar y reducir las fallas que pueden ocurrir en el sistema, proceso o servicio. El RCM puede ser una parte excelente de la estrategia general de mantenimiento y producción (Hipkin y De Cock, 2000).

## **2.4 Análisis basado en confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad**

Las piezas de maquinaria para generación eléctrica están diseñadas para tener una calidad muy alta. Esto significa que también son muy fiables. El fabricante (Hyundai) y el propietario (CELEC EP) deben estar satisfechos de que la calidad del elemento debe ser compensada por el aumento de los costos. Por tanto, además de razones de eficiencia en las circunstancias de trabajo, la elección de maquinaria, materiales y configuración de una central de generación se guiará por sus indicadores de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

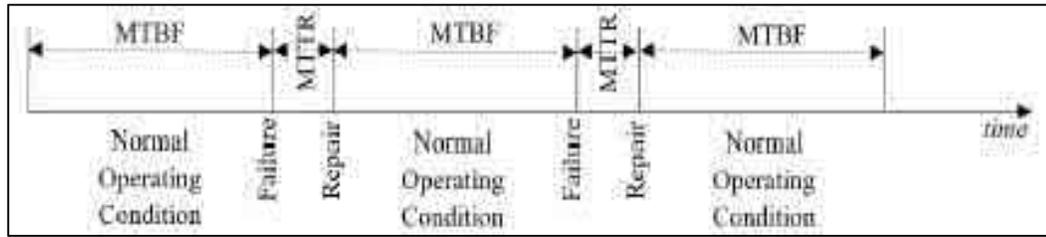
La predicción de los indicadores de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad con puntajes confiables relacionados son datos cuantitativos que debe proporcionar la ingeniería de confiabilidad y mantenibilidad. Estos datos pueden contribuir a opciones de rendimiento más sólidas, lo que genera mayores ingresos con el tiempo. Por lo tanto, los diseñadores y operadores pueden evaluar y mejorar el pronóstico sobre:

- Frecuencia de los períodos de inspección
- Frecuencia de los períodos de reparación
- Frecuencia de solicitud de repuestos
- Programación de producción

### **2.4.1 *Tiempo medio entre fallos***

El tiempo medio entre fallas (MTBF) es el tiempo de ejecución promedio del sistema reparable o los componentes del sistema entre dos fallas (Figura 2-2). Se calcula como la relación entre el tiempo total de funcionamiento hasta las primeras fallas y el número de equipos producidos por

los equipos producidos en los sistemas industriales. Para calcular estos valores, se debe producir y comenzar a utilizar una cantidad suficiente de dispositivos.



**Figura 3-2.** Tiempo medio entre falla y tiempo medio para el ciclo de reparación.

Fuente: Camero, M. (2006)

Cuando se consideran los sistemas de una central de generación, el tiempo medio entre fallos debería calcularse no por el número de equipos sino por el número de fallos. Esto se debe a que los sistemas tienen dos o tres copias de seguridad de un sistema o componente del sistema. MTBF en sistemas de generación; se calcula como la relación entre el tiempo total de funcionamiento sin fallas del sistema o componente del sistema respectivo y el número total de fallas dentro de un período específico y un tipo de falla específico (Uzgören et al, 2010).

El MTBF es un parámetro clave de confiabilidad del sistema para el sistema o componente que se puede reparar. Se describe como el tiempo medio en que un sistema opera sin fallas. El MTBF puede determinarse por el tiempo de ejecución promedio antes de que ocurra una falla o tomando la distribución media de la falla. Luego, se especifica un valor medio o esperado (Uzgören et al, 2010).

Para una información sobre  $n$  elementos con fallas  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , MTBF se define como:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Número de fallas}} \quad (7)$$

#### 2.4.2 Tiempo medio hasta el fallo

El tiempo medio hasta la falla es el tiempo promedio durante el cual el componente del sistema, que no se puede reparar, se reemplaza por uno nuevo después de una falla y recupera las condiciones normales de funcionamiento hasta la siguiente falla. Algunos componentes del sistema se fabrican como desechables. Estos componentes se reemplazan cuando ocurren fallas o durante los intervalos normales de mantenimiento.

### 2.4.3 *Tiempo medio de reparación*

El tiempo medio de reparación (MTTR) es el tiempo medio necesario para restaurar un sistema o componente que no ha vuelto a las condiciones normales de funcionamiento.

El tiempo requerido para la reparación depende de las condiciones del sistema, el suministro de repuestos y el grado de competencia del personal a reparar, se calcula mediante la ecuación:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de fallas}} \quad (8)$$

### 2.4.4 *Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM/RAM)*

Los desarrollos en análisis de sistemas orientados a la confiabilidad y estudios de mantenimiento, que comenzaron en la década de 1960 y continuaron desarrollándose hasta el día de hoy, se aplican en muchos sectores industriales. Hay muchos estudios sobre la importancia y las aplicaciones de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM) y el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). La confiabilidad es una de las cualidades más importantes de las buenas prácticas de ingeniería.

RAM y RCM son enfoques muy similares. La principal diferencia entre RAM y RCM es que el enfoque RAM es más prominente que RCM en las etapas de diseño y producción de los productos. RCM es un tipo de enfoque que tiene como objetivo mejorar la rentabilidad del mantenimiento y proporcionar aplicaciones de mantenimiento confiables. Por otro lado, RAM aborda no solo las prácticas de mantenimiento sino también el ciclo de vida. En otras palabras, proporciona una estructura de sistema fiable y utilizable en el proceso desde la primera fase de producción de un producto hasta el final de su vida (De Sanctis et al., 2016).

Para el análisis RAM, se utiliza fórmulas de métodos de distribución que son función de densidad de probabilidad, parámetros de distribución, tiempo medio entre fallas, desviación estándar, fórmulas de confiabilidad y mantenibilidad (Uzgören et al, 2010). Las fórmulas, exponencial, normal y Weibull son las distribuciones más utilizadas en los cálculos de análisis de confiabilidad y mantenibilidad, ya que permiten determinar la expectativa de que una falla suceda o predecirla.

## 2.5 **Modelo de distribución de fallas**

La tasa de fallas es la frecuencia con la que falla un sistema o componente, donde las fallas se

miden por unidad de tiempo. La tasa de fallas generalmente se basa en el tiempo y la tasa difiere durante el ciclo de vida del sistema.

La tasa de fallos es el nivel de fallos, expresado por ejemplo en fallos por hora, de un sistema o componente diseñado. En la práctica, un tiempo medio entre fallas (MTBF) más comúnmente articulado y utilizado para componentes o sistemas de calidad está estrechamente relacionado. La tasa de fallas a menudo depende del tiempo, y un corolario elemental es que la frecuencia cambia con el tiempo en comparación con el ciclo de vida previsto del sistema.

A continuación, se presentan los parámetros de las diferentes distribuciones empleadas e ingeniería de mantenimiento para evaluar confiabilidad y mantenibilidad en específico, este enfoque estadístico se fundamenta en el promedio y desviación estándar de la tasa de falla.

### 2.5.1 *Distribución normal*

Función de densidad de probabilidad: 
$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

Tiempo medio entre fallos: 
$$MTBF = \mu \quad (10)$$

Desviación estándar: 
$$\sigma = \sqrt{\frac{(t-\mu)^2}{N}} \quad (11)$$

Confiabilidad: 
$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (12)$$

Mantenibilidad: 
$$M(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (13)$$

Nota:  $\Phi$  es la función de distribución acumulada para la variable normal estándar ( $z$ ).

### 2.5.2 *Distribución exponencial*

Función de densidad de probabilidad: 
$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (14)$$

Parámetros de distribución: 
$$\text{Tasa de fallo} = \lambda \quad (15)$$

Tiempo medio entre fallos: 
$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (16)$$

Desviación estándar:  $\sigma = \frac{1}{\lambda}$  (17)

Confiabilidad:  $R(t) = e^{-\lambda t}$  (18)

Mantenibilidad:  $M(t) = 1 - e^{-\lambda t}$  (19)

### 2.5.3 *Distribución de Weibull*

Función de densidad de probabilidad:  $f(t) = \beta \alpha^{-\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$  (20)

Parámetros de distribución: Parámetro de escala=  $\alpha$ , parámetro de forma=  $\beta$  (21)

Tiempo medio entre fallos:  $MTBF = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$  (22)

Desviación estándar:  $\sigma = \alpha \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) + \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}$  (23)

Confiabilidad:  $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$  (24)

Mantenibilidad:  $M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$  (25)

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Descripción de la Central Termoelectrica Quevedo II.

La central de generación termoelectrica Quevedo II cuenta con una capacidad de generación de energía de aproximadamente 102 MW, energía suficiente para alimentar a 50 poblaciones pequeñas o 4 ciudades de mediana población en Ecuador (Figura 1-3).

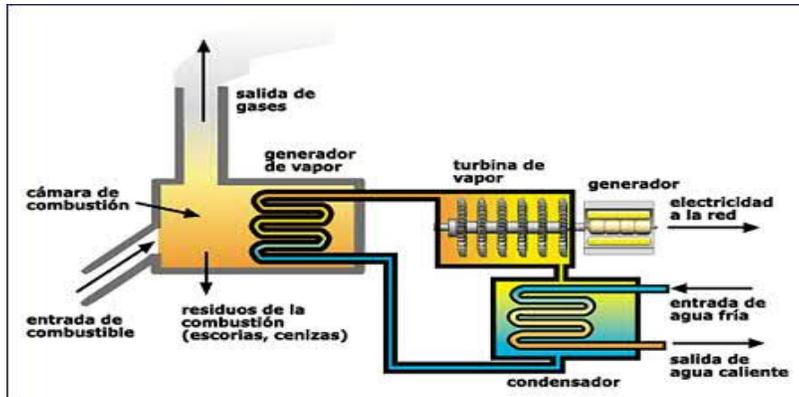


**Figura 1-3.** Central Termoelectrica Quevedo II

Fuente: CELEC EP, (2017)

#### 3.2 Diagrama funcional del proceso de generación eléctrica

La energía termoelectrica utiliza calor para generar electricidad. El mecanismo principal de la energía termoelectrica se basa en usar el calor para aumentar la temperatura de un fluido (generalmente agua) hasta que este se evapora. El vapor liberado activa una turbina, la cual comienza a girar. De esta manera, la energía térmica se convierte en cinética (energía del movimiento); la turbina está conectada a un generador que, gracias a este movimiento, puede producir electricidad (Figura 2-3).

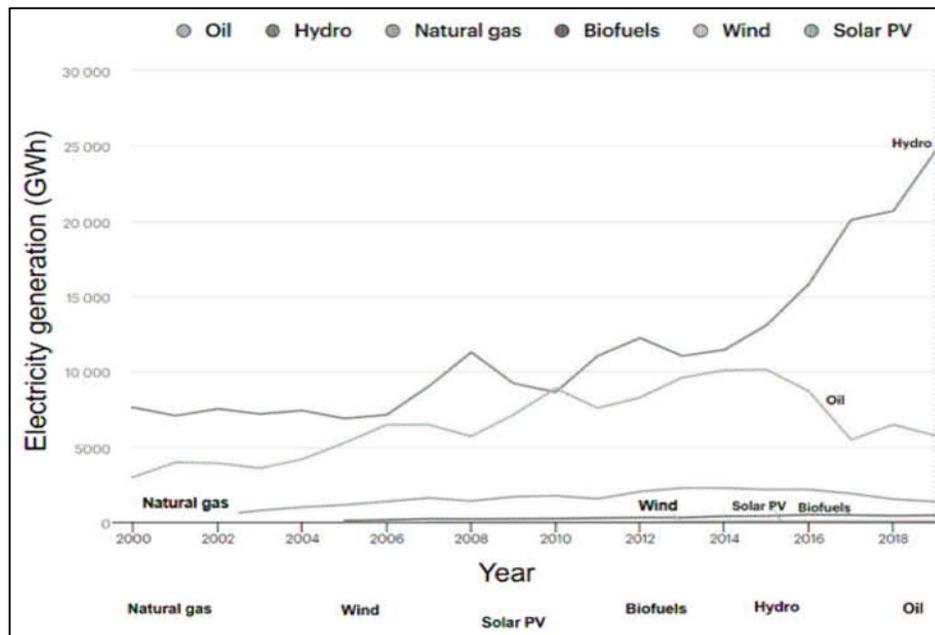


**Figura 2-3.** Esquema de funcionamiento de una central de generación termoeléctrica

Fuente: Carnero, M. (2006)

De acuerdo con el combustible utilizado para generar calor, se puede distinguir entre varios tipos de energía termoeléctrica: basada en combustibles fósiles, nucleares, geotérmicos y geo-solar. El mecanismo más empleado consiste en quemar combustibles no renovables (carbón, gas natural o derivados de petróleo).

Aunque la tendencia actual busca reducir el uso de combustibles no renovables, la energía termoeléctrica es una de las más empleadas a nivel mundial y en Ecuador aparece como la segunda fuente de generación detrás de la energía hidroeléctrica (Figura 3-3).



**Figura 3-3.** Generación de energía eléctrica en función de la fuente utilizada, periodo 2000-2018.

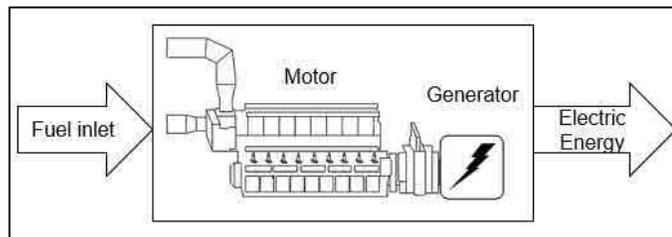
Fuente: EIA, (2006)

### 3.3 Características de las unidades de generación

El corazón de la generación termoeléctrica es el motor (Hyundai H2132) (Figura 4-3). Este motor está diseñado para trabajar a una velocidad de entre 900 y 1000 RPM, utiliza como combustible diésel, con un consumo aproximado de 180 g / kWh. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, la vida útil de este motor supera los 20 años y provee una disponibilidad superior al 88 %. Las dimensiones y otras características técnicas se muestran en la Figura 5-3.



(a)



(b)

**Figura 4-3.** Unidad de generación: (a) Motor Hyundai H21/32P, (b) esquema de funcionamiento.

Fuente: HYUNDAI. (2021)

**Tabla 1-3.** Datos técnicos del motor Hyundai

Modelo del motor	H21/32
Potencia nominal del motor [kW]	1800
Potencia del generador [kW]	1710
Peso total [ton]	50
Sistema de enfriamiento	Radiador
Combustible	Fuel oil No. 6
Velocidad de máquina [rpm]	900
Consumo específico de combustible [g.kWh <sup>-1</sup> ]	183
Poder calorífico inferior del combustible (PCI)	42700 kJ/kg

Fuente: HYUNDAI. (2021)

Realizado por: Taco, E

Description	Hyundai System
Engine Speed	<b>900~1,000 rpm</b>
Major Usage	<b>Base Load Continuous Operation</b>
Fuel Use	<b>Heavy Fuel Oil #6, Diesel Oil #2</b>
Availability	<b>More than 88%</b>
Maintenance	<b>Simple &amp; Easy Done at Site</b>
Fuel Consumption (SFOC*)	<b>50Hz : 185 g/kWh   60Hz : 183 g/kWh</b>
Life Time	<b>More than 20 Years</b>
Maintenance Hour [Cyl. Head]	<b>12,000 hr. Operation</b>

\*SFOC : Without engine driven pumps

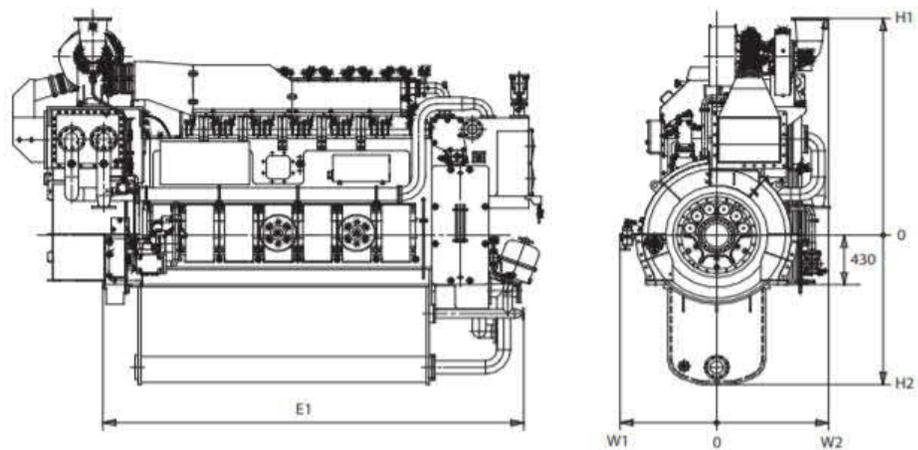
### H21/32P I Bore: 210 mm, Stroke: 320 mm

#### Controllable Pitch Propeller

Permit high skew angles to minimize noise and vibration.

#### Fixed Pitch Propeller

Guarantee optimum thrust, minimal noise and vibration level.



#### Dimensions

900 rpm	cyl.	Rated Output at Engine (kW)	Engine dimension (mm) & dry weight (ton)					Dry Weight
			E1	H1	H2	W1	W2	
	6	1,200	3,535	1,885	1,300	812	939	18.0
	7	1,400	3,865	1,885	1,300	812	939	20.0
	8	1,600	4,195	2,059	1,355	812	1,005	21.0
	9	1,800	4,525	2,059	1,355	812	1,005	23.0

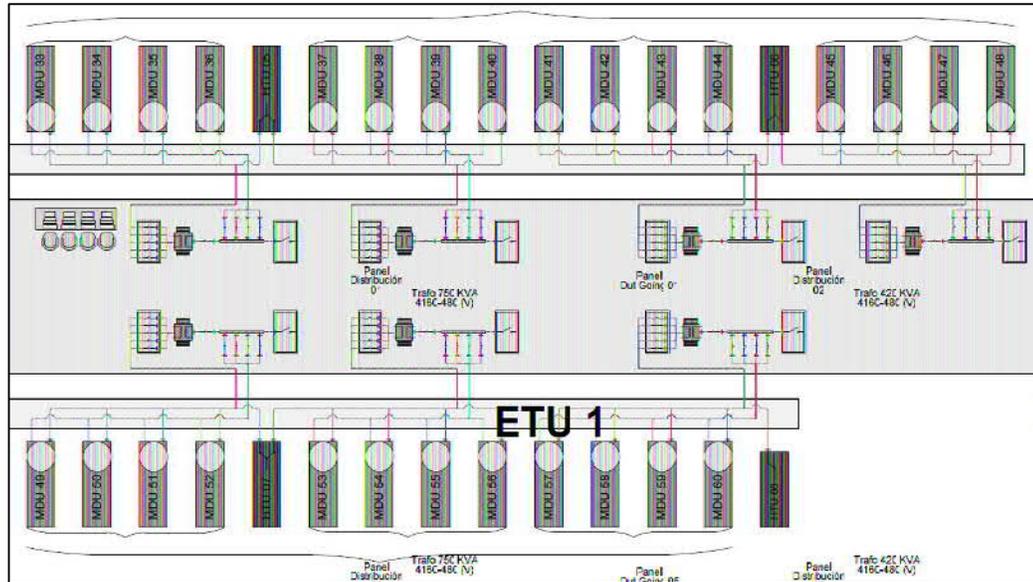
E1 : Dimension between eng. flywheel to eng. free end.  
In case of dry sump, the weight and height will be reduced.

**Figura 5-3.** Dimensiones del Motor Hyundai H21/32.

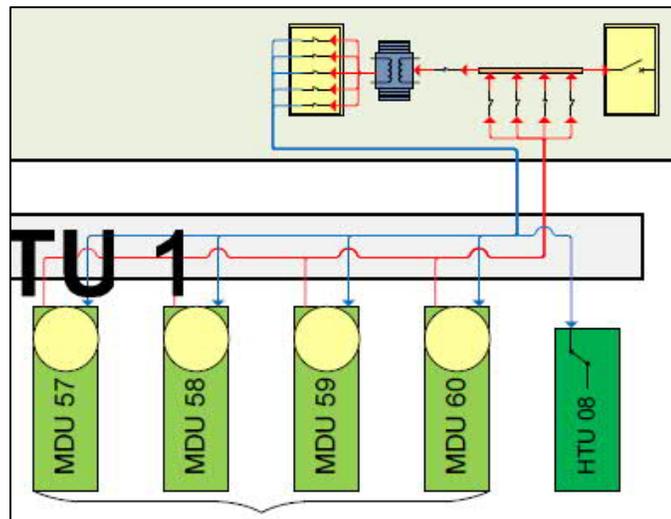
Fuente: HYUNDAI. (2021)

### 3.4.1 Recolección y selección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación se recolectaron datos desde el 2012 hasta el 2016. Y como caso de estudio se escogió al motor que presentaba mayores inconvenientes, con una media de nueve fallos anuales. Las unidades de generación están distribuidas en 15 plantas, de las cuales cada planta está conformada por 4 unidades. Lo que genera una capacidad nominal de 6,8 (MW) por cada planta (Figura 6-3).



(a)



(b)

**Figura 6-3.** (a) Distribución de las unidades de generación, (b) Motor MDU60 – objeto de estudio

Fuente: Carnero, M. (2006)

Del histórico de los reportes se han identificado un total de 43 fallos, donde las fallas de mayor frecuencia corresponden a problemas en la bomba de inyección y rotura de orings en válvulas. Ya que cada unidad cuenta con un horómetro en cada reporte de fallo es posible conocer el MTBF, así como el MTTR; conociendo estas variables se puede aplicar las ecuaciones (2.2), (2.4) y (2.6) para determinar la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, respectivamente.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Análisis RAM en las unidades de generación

De acuerdo con la metodología explicada en el capítulo 2, y la aplicación de la norma IEC 61703, resumida en las ecuaciones (2.2 – 2.6), se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 1-4) (Ver ANEXO B):

**Tabla 1-4.** Resultados del análisis RAM

<b>Confiabilidad</b>	93.71%
<b>Disponibilidad</b>	82.57%
<b>Mantenibilidad</b>	26.48%

Fuente: Taco, E. (2022)

Los resultados obtenidos analíticamente se comparan con los reportes entregados por CELEC EP. Desde el arranque de las unidades de generación, los índices de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad se han visto afectados en base a la complejidad y prácticas de mantenimiento sobre los modos de falla que han aparecido, debido principalmente a que estas unidades constituyen las primeras que se han instalado en Ecuador para la generación termoeléctrica.

Como consecuencia, se reportan fallas inesperadas en los motores, que impactan de manera directa la disponibilidad, ya que los mismos requieren de una planificación adecuada en las estrategias del mantenimiento que se realizan para mantener operativos a su máxima capacidad de funcionamiento.

A continuación, se presentan las siguientes fallas en las unidades de generación que afectan directamente a la disponibilidad de los equipos.

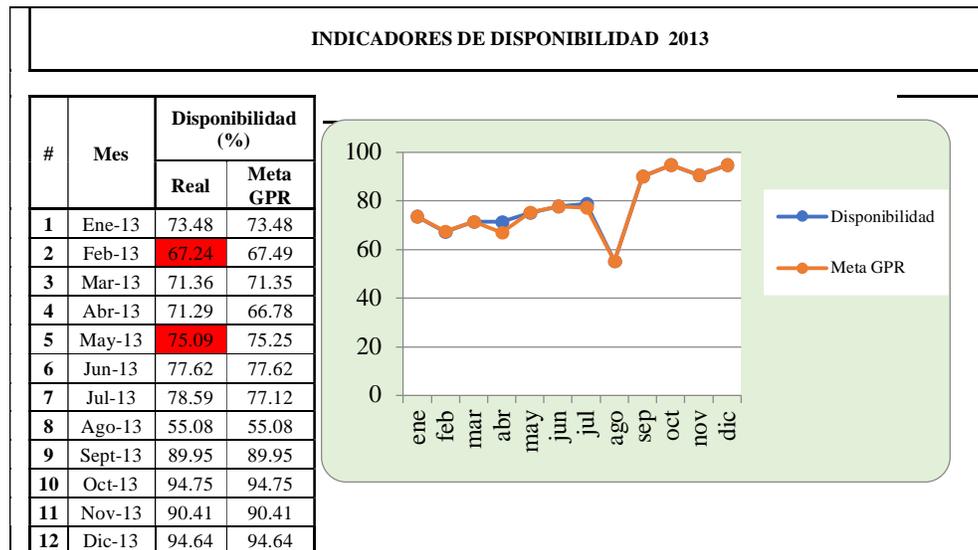
- Desgaste de los elementos internos del motor.
- Altas temperaturas de salida de gases.
- Calibración inadecuada del sistema de inyección.
- Desbalance de turbocargadores.
- Vibraciones en el equipo
- Mala combustión.

- Consumo excesivo de aceite lubricante.

#### 4.1.1 Disponibilidad

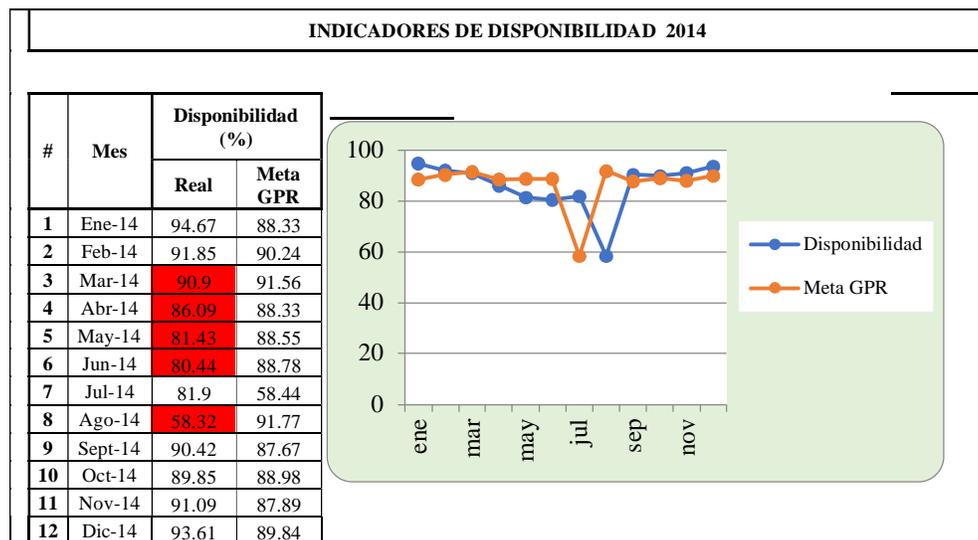
En la Tabla 2-4 se muestran los indicadores de disponibilidad del año 2013, obtenidos de las unidades de generación Hyundai H21/32; donde se evidencia la línea representada de color azul que en los meses de febrero y mayo el indicador no ha cumplido en comparación con las metas establecidas en el GPR.

**Tabla 2-4.** Seguimiento anual de la disponibilidad 2013



Fuente: CELEC EP, (2016)  
Realizado por: Taco E 2022

**Tabla 3-4.** Seguimiento anual de la disponibilidad 2014

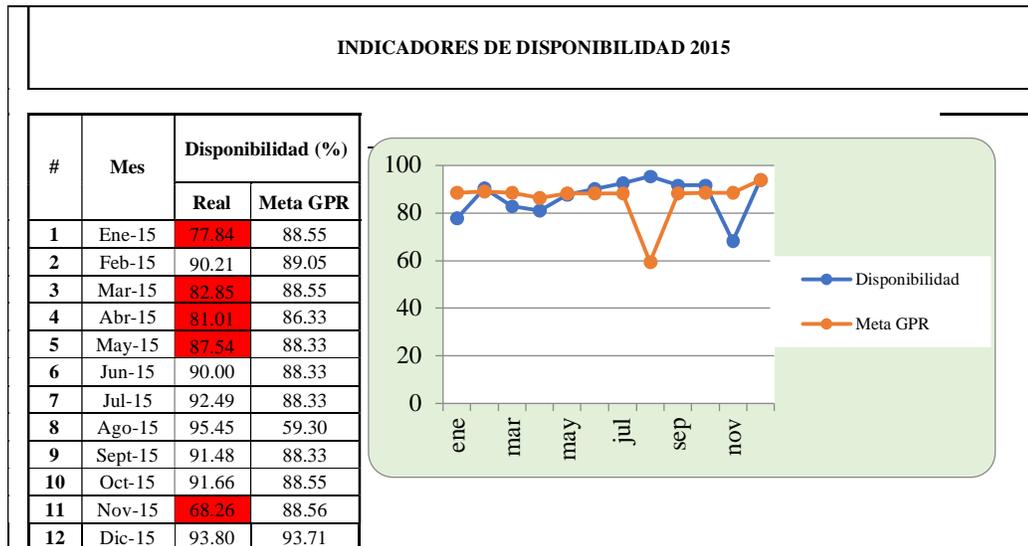


Fuente: CELEC EP, (2016)  
Realizado por: Taco E 2022

En la Tabla 3-4 se muestran los indicadores de disponibilidad del año 2013, obtenidos de las unidades de generación Hyundai H21/32; donde se evidencia la línea representada de color azul que en los meses de marzo hasta junio y agosto el indicador no ha cumplido en comparación con las metas establecidas en el GPR.

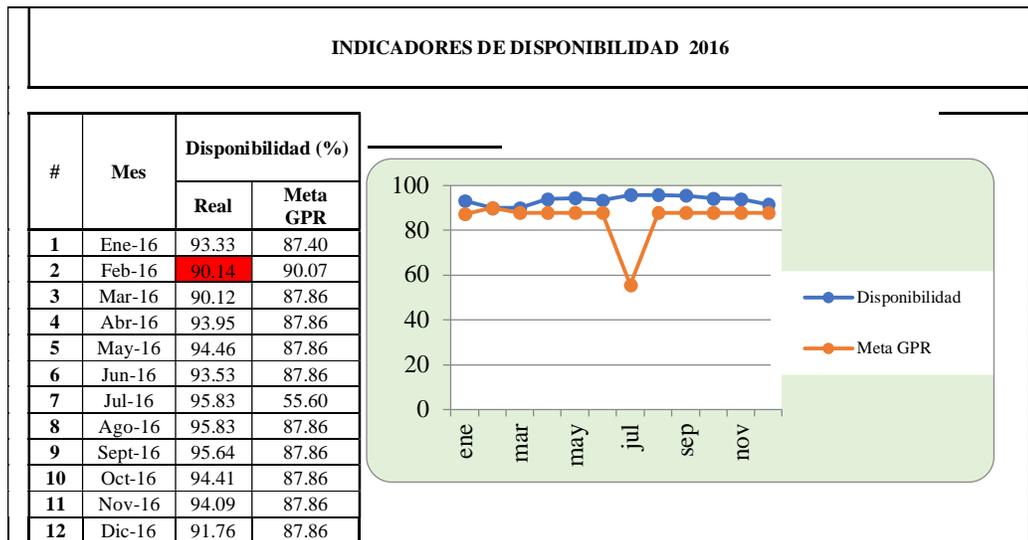
En la Tabla 4-4 y Tabla 5-4 se muestran los indicadores de disponibilidad del año 2015 y 2016, obtenidos de las unidades de generación Hyundai H21/32; donde los meses resaltados de color rojo no se ha cumplido en comparación con las metas establecidas en el GPR.

**Tabla 4-4.** Seguimiento anual de la disponibilidad 2015



Fuente: CELEC EP, (2016)  
Realizado por: Taco E 2022

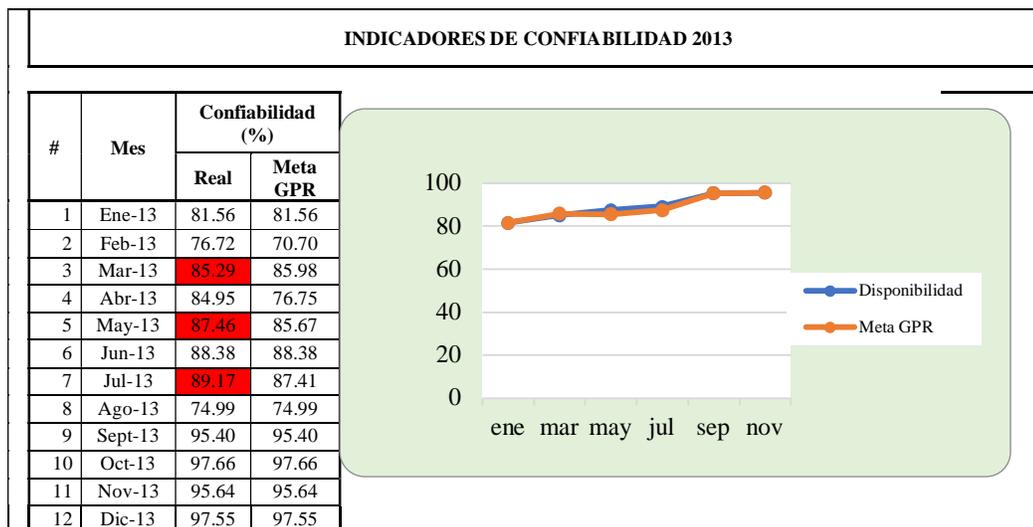
**Tabla 5-4.** Seguimiento anual de la disponibilidad 2016



Fuente: CELEC EP, (2016)  
Realizado por: Taco E 2022

#### 4.1.2 Confiabilidad

**Tabla 6-4.** Seguimiento anual de la confiabilidad año 2013

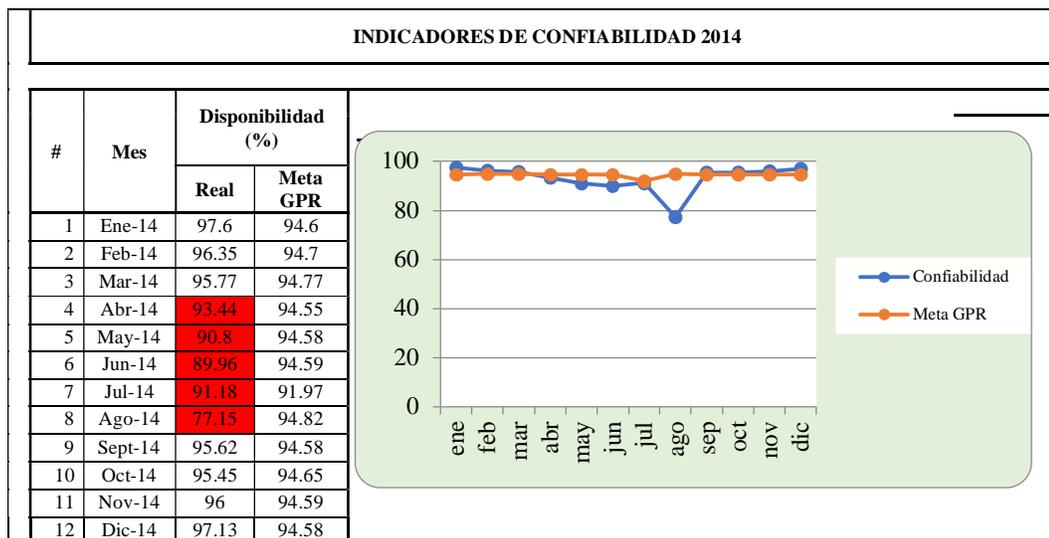


Fuente: CELEC EP, (2016)

Realizado por: Taco E 2022

En la Tabla 6-4 se muestran los indicadores de confiabilidad del año 2013, obtenidos de las unidades de generación Hyundai H21/32; donde se evidencia la línea representada de color azul que en los meses de marzo, mayo y julio el indicador no ha cumplido en comparación con la meta establecida en el GPR.

**Tabla 7-4.** Seguimiento anual de la confiabilidad año 2014



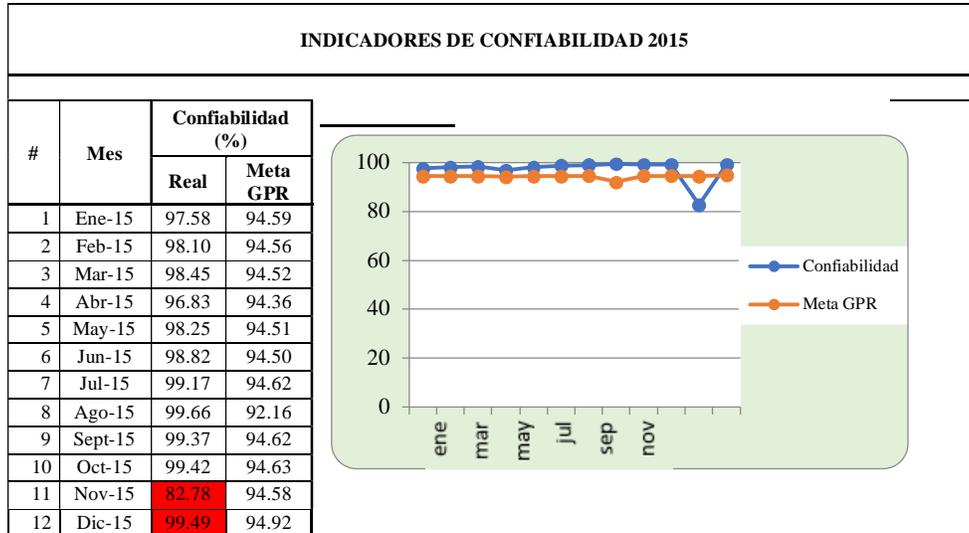
Fuente: CELEC EP, (2016)

Realizado por: Taco E 2022

En la Tabla 7-4 se muestran los indicadores de confiabilidad del año 2014, obtenidos de las unidades de generación Hyundai H21/32; donde se evidencia la línea representada de color azul

que en los meses de abril hasta agosto el indicador no ha cumplido en comparación con la meta establecida en el GPR.

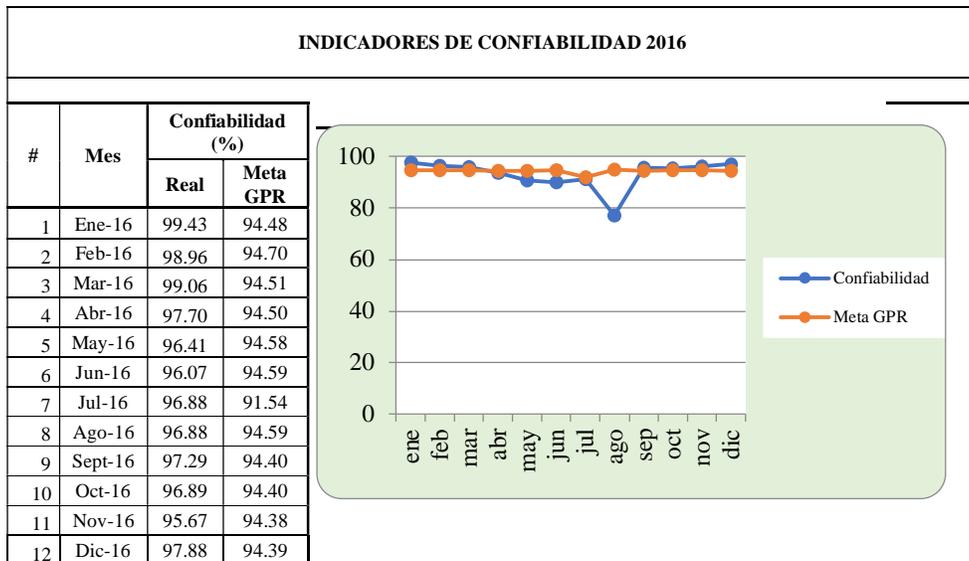
**Tabla 8-4.** Seguimiento anual de la confiabilidad año 2015



Fuente: CELEC EP, (2016)

Realizado por: Taco E 2022

**Tabla 2-4.** Seguimiento anual de la confiabilidad año 2016



Fuente: CELEC EP, (2016)

Realizado por: Taco E 2022

En la Tabla 8-4 se muestran los indicadores de confiabilidad del año 2015, obtenidos de las unidades de generación Hyundai H21/32; donde se evidencia los meses resaltados de rojo no cumple en comparación con la meta establecida en el GPR. Y los datos del año 2016 Tabla 9-4 se aprecia que todos los meses se ha cumplido con este indicador.

Los resultados obtenidos analíticamente en la Tabla 1-4, muestran una media similar a la reportada por los técnicos de mantenimiento de la Central Termoeléctrica Quevedo II.

#### 4.1.3 *Mantenibilidad*

La Tabla 10-4 detalla la mantenibilidad del motor N.60 analizado en el periodo de enero 2012 a diciembre 2016, donde se muestra los siguientes indicadores:

- Número de horas trabajadas por la Unidad N.60
- Número de horas fuera de servicio por mantenimiento correctivo.
- Número de horas fuera de servicio por mantenimiento programado.
- Número de horas en las que el activo se encuentra apagado a la espera de ser despachado por el Operador Nacional de Electricidad CENACE.

**Tabla 3-4.** Horas de trabajo del motor, periodo 2012-2016

<b>Descripción</b>	<b>Horas</b>
Horas totales por mantenimientos correctivos	1062
Horas totales por mantenimientos programados	4949
<b>Tiempo fuera de servicio por mantenimientos (periodo ene/12 - dic/16)</b>	<b>6011</b>
Horas totales por no despacho del CENACE (ene/12 - dic/16)	9309
Horas totales fuera de servicio (periodo ene/12 - dic/16)	15320
Horómetro inicial motor n.60 ene/12	4960
Horómetro final motor n.60 dic/16	33440
Total, horas de generación motor n.60 (ene/12 - dic/16)	28480
Horas total periodo comprendido ene/12 - dic/16	43800

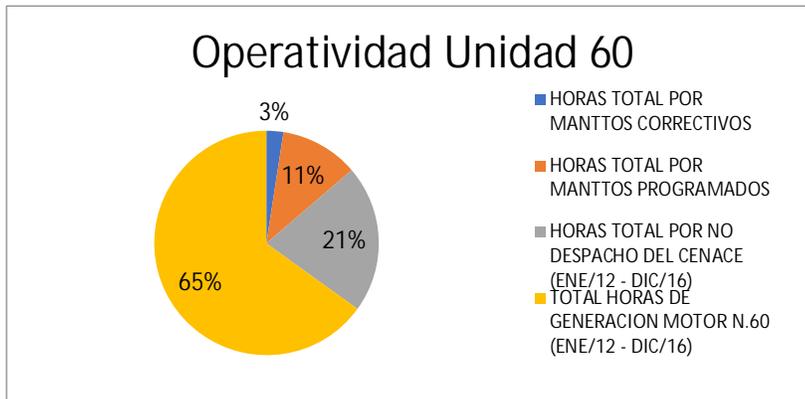
Fuente: CELEC EP, (2016)

Con el tiempo fuera de servicio o MTTR de 6011 horas en un total de 43 paradas, se tiene un índice de mantenibilidad de 26.48 %. En la

**Figura 1-4** se indica el porcentaje global de generación (65 %) y la fracción correspondiente a cada tipo de mantenimiento.

De la Tabla 1-4, se puede extrapolar que existe un 14% que representa en tiempo fuera de servicio por mantenimientos, este indicador deberá ser disminuido para obtener una reducción en los tiempos que se ejecuta las tareas de mantenimientos mediante estrategias y acciones del área de mantenimiento, aplicando técnicas de diagnóstico integral, utilizando herramientas como el análisis causa raíz, análisis de modos de fallo, mantenimiento basado en condición,

mantenimiento programado y otras.



**Figura 1-4.** Representación del porcentaje de operatividad de la unidad 60

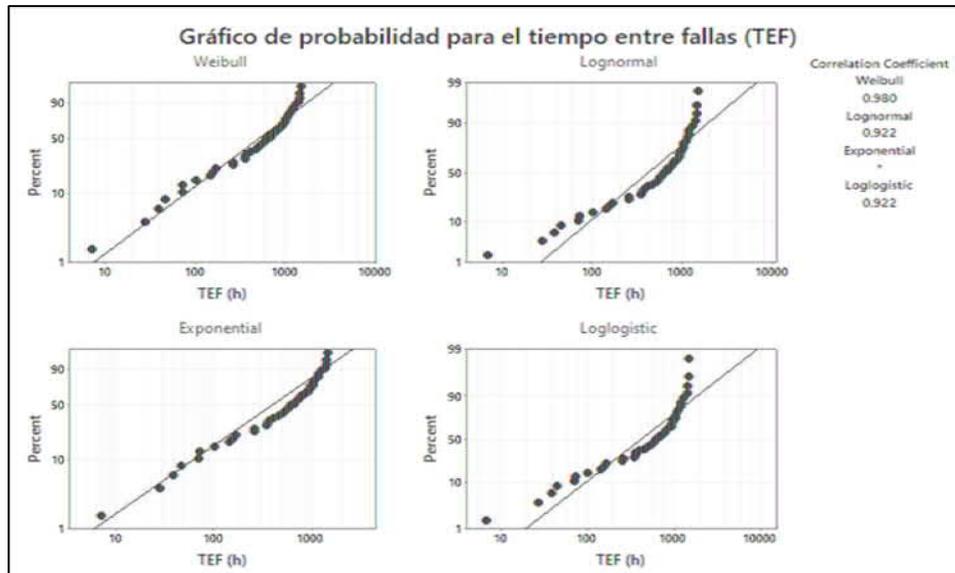
Fuente: Taco, E. (2022)

## 4.2 Análisis con el método de distribuciones

Para determinar el gráfico de distribución que mejor se ajuste a los datos obtenidos de los reportes de mantenimiento, se realiza mediante el software de estadística Minitab 19 desarrollado en la Universidad Estatal de Pensilvania. Como parámetro de evaluación se utiliza el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), el cual determina qué tan bien la distribución se ajusta a los resultados observados.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (27)$$

Donde  $y_i$  representa el valor real,  $\bar{y}_i$  la media aritmética, y  $\hat{y}_i$  el valor del modelo predicho.



**Figura 2-4.** Ajuste de la función que mejor se ajusta a los datos del tiempo entre fallos (TEF)

Fuente: Taco, E. (2022)

En la Figura 2-4, se puede observar que la distribución de Weibull presenta el mayor coeficiente de correlación ( $R^2=0.98$ ), por tanto, es la distribución utilizada para evaluar los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Además, se presenta las evaluaciones de todas las distribuciones disponibles en Minitab (Tabla 10-4).

En la Tabla 11-4 se muestra los resultados de los datos de los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) de los diferentes tipos de distribuciones disponibles en Minitab, Es de in indicar que estos son los resultados de los datos históricos de mantenimiento ingresados.

**Tabla 11-4.** Valores de ajuste de las distribuciones sobre los datos históricos de mantenimiento

Distribución	Anderson-Darling (adj)	Coefficiente de Correlación ( $R^2$ )
Weibull	1.167	0.980
Lognormal	2.378	0.922
Exponential	3.048	*
Loglogistic	2.480	0.922
3-Parameter Weibull	0.966	0.983
3-Parameter Lognormal	0.790	0.981

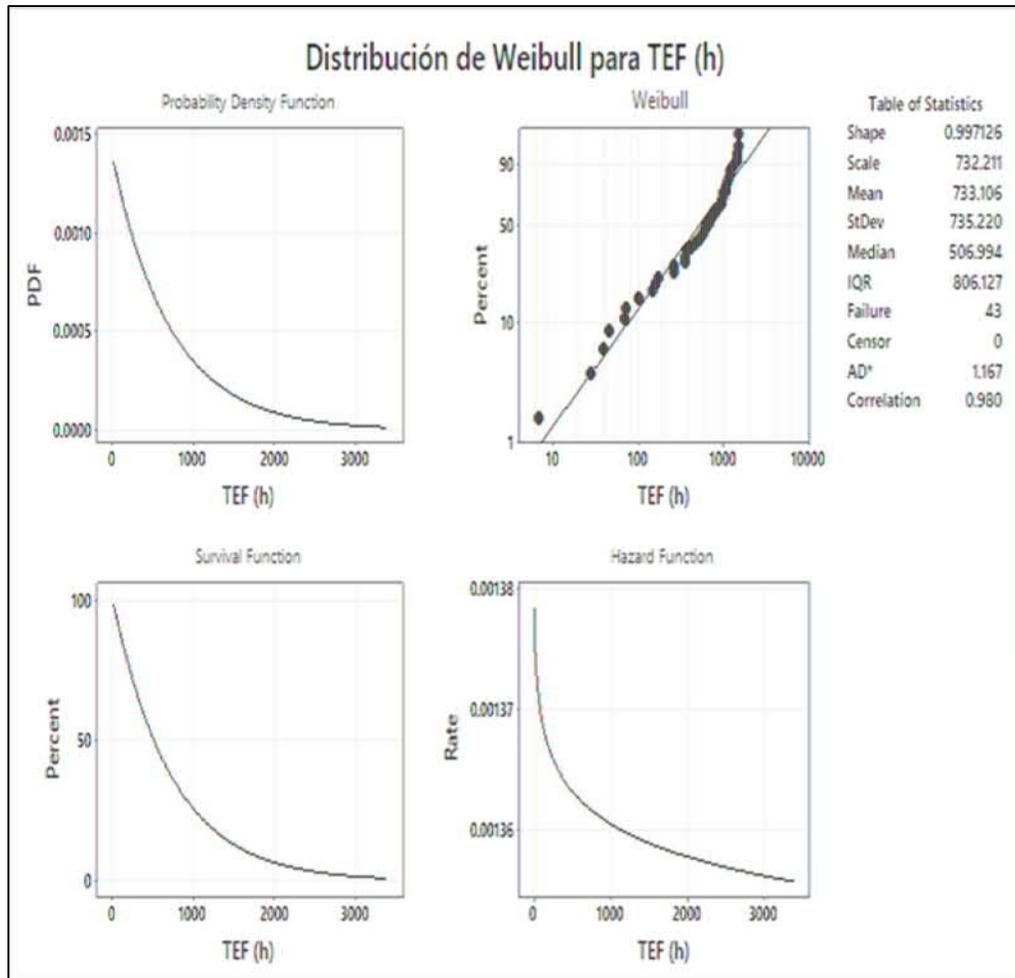
2-Parameter Exponential	3.199	*
3-Parameter Loglogistic	1.079	0.969
Smallest Extreme Value	2.447	0.935
Normal	0.813	0.980
Logistic	1.077	0.968

Fuente: Minitab

Realizado por: Taco, E. (2022)

El ajuste de la curva es por linealización  $R^2$  no es anova, por tanto, no hay valor P.

En la Figura 3-4 se observa la evaluación general de la distribución de Weibull, así como los parámetros estadísticos para calcular los índices de confiabilidad y mantenibilidad presentadas en las ecuaciones (21-26). En la parte superior izquierda, se presenta la función de densidad de probabilidad (PDF) versus al tiempo entre fallas (TEF). A la derecha, se muestra el ajuste; en la parte inferior se muestra a la izquierda la función de supervivencia (*survival function*) o función de confiabilidad, que da la probabilidad de que un objeto de interés sobreviva más allá de un tiempo determinado y en la parte derecha se tiene la función de riesgo (*hazard function*) o tasa de riesgo empleada para calcular la tasa de falla para intervalos de tiempo cada vez más pequeños.



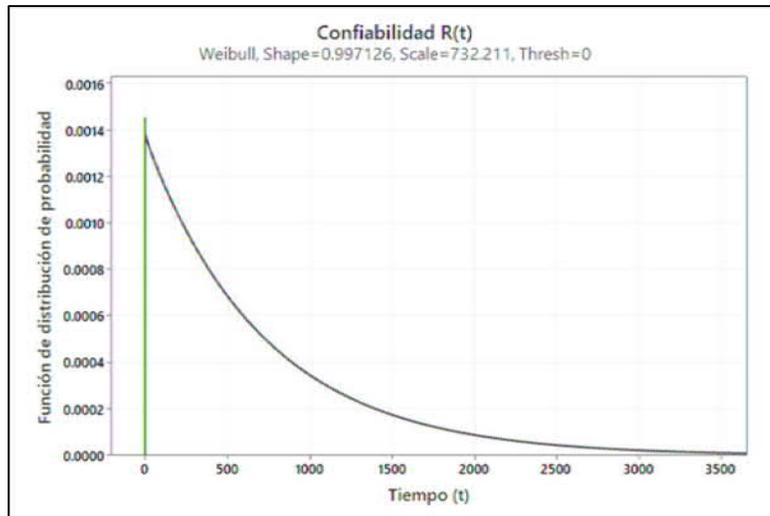
**Figura 3-4.** Valores de la distribución de Weibull

**Fuente:** Minitab

**Realizado por:** Taco, E. (2022)

Con los valores estadísticos obtenidos a través de la distribución de Weibull, se obtiene los índices de confiabilidad y mantenibilidad de 94.25 y 5.75% respectivamente. Aplicando las ecuaciones descritas en la sección 2.5.3.

En la Figura 4-4 se muestra la función de distribución de probabilidad para determinar la confiabilidad del sistema de acuerdo con las ecuaciones (25-26).

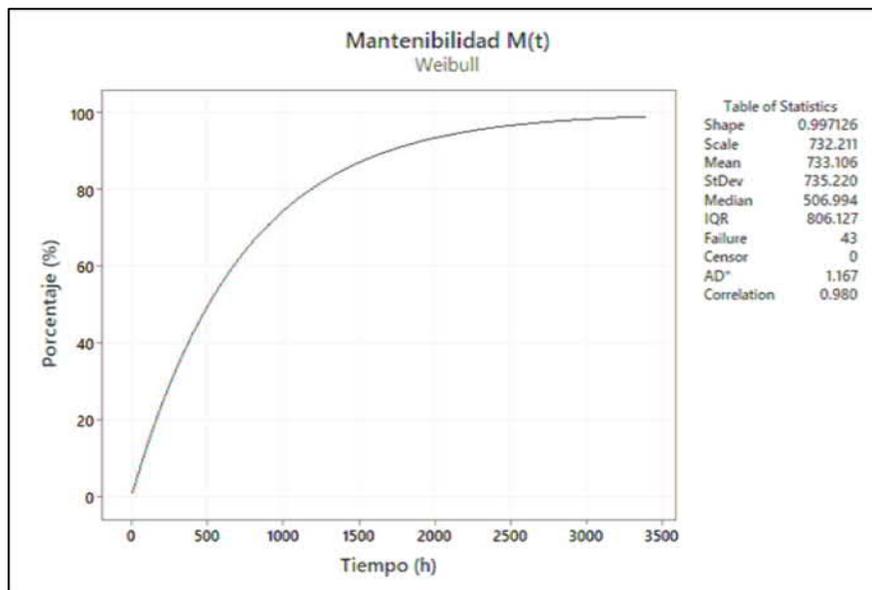


**Figura 4-4.** Función de distribución de probabilidad Weibull de Confiabilidad

Fuente: Minitab

Realizado por: Taco, E. (2022)

En la Figura 5-4 se muestra la función de distribución de probabilidad para determinar la mantenibilidad, el mismo que se puede evaluar como el complemento de la confiabilidad. Donde una vez alcanzado el tiempo medio de fallos el fallo habría de producirse con seguridad.



**Figura 5-4.** Función de distribución de probabilidad Weibull de Mantenibilidad

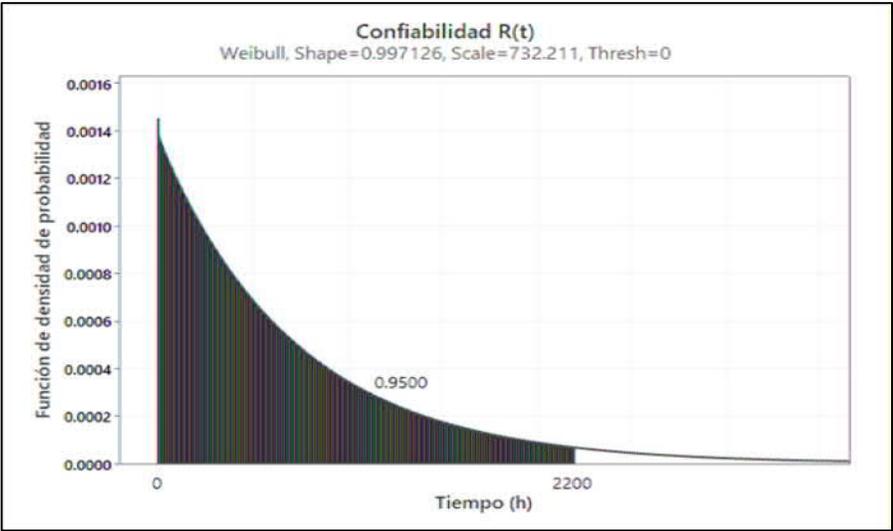
Fuente: Minitab

Realizado por: Taco, E. (2022)

### 4.3 Análisis

Una de las ventajas de usar un software dedicado como Minitab, es que permite utilizar

herramientas de análisis, para de esta manera determinar el porcentaje de fallo en un determinado tiempo.



**Figura 6-4.** Confiabilidad - Probabilidad de falla cada 2200 horas (95%)

Fuente: Minitab  
Realizado por: Taco, E. (2022)

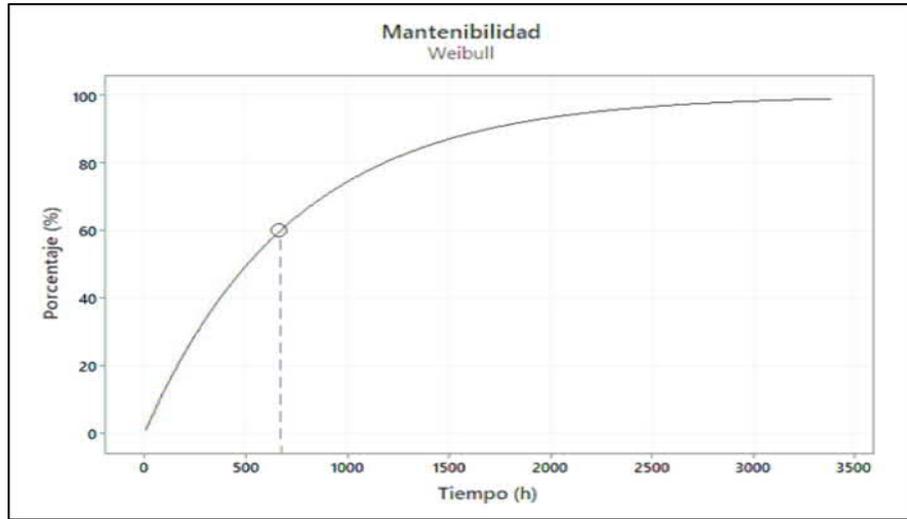
En la Figura 6-4 se puede observar que en color rojo se tiene la probabilidad de fallo; la función de densidad probabilidad tiene un comportamiento semejante al presentado en la curva de la bañera, donde existe una alta posibilidad de fallo en una primera etapa, y mientras se conoce el funcionamiento del motor la probabilidad va disminuyendo, es así como para un periodo de funcionamiento de 2200 horas se tiene una probabilidad de fallo de 95%.



**Figura 7-4.** Probabilidad de falla en MTBF (59.54%)

Fuente: Minitab  
Realizado por: Taco, E. (2022)

En la Figura 7-4 se aprecia que, para el MTBF se tiene una probabilidad de fallo de 59.54 % al transcurrir 662 horas de operación.



**Figura 8-4.** Mantenibilidad en MTBF (60 %)

Fuente: Minitab

Realizado por: Taco, E. (2022)

De acuerdo con la Figura 7-4 con el análisis de mantenibilidad se tiene un índice alrededor del 60% en el MTBF, esta tasa aumenta con el paso del tiempo ya que el equipo se aproxima al tercer ciclo de acuerdo con la curva de bañera (desgaste). Por tanto, se requerirá del equipo de mantenimiento para recuperar las partes desgastadas.

#### 4.3.1 Análisis de costos

Generalmente las unidades de generación son sometidas a un mantenimiento preventivo cada 2000 horas de operación. En 2015, se realizó un mantenimiento predictivo (24000 horas) a todas las unidades de la central, que consistió en una serie de tareas que requirieron el cambio de varios elementos ya que cumplieron sus horas de vida útil. En la Tabla 12-4, se detalla el ciclo de mantenimiento y duración de las tareas de mantenimiento ejecutadas periódicamente.

**Tabla 42-4.** Ciclos de mantenimiento realizados

Mantenimientos	Ciclo de mantenimiento	Días de duración
Mantenimientos periódicos	Cada 2000 horas	3
Mantenimientos semi-overhaul	Cada 6000 y 18000 horas	7
Mantenimientos mayores	Cada 12000 horas.	12

Fuente: CELEC EP, (2016)

Realizado por: Taco E 2022

#### 4.3.2 Servicio especializado para mantenimientos programados.

Con el fin de operar la central termoeléctrica de acuerdo con lo establecido por el fabricante, es imperativo garantizar la máxima disponibilidad de las unidades. Esto es posible aplicando las mejores prácticas para operación y mantenimiento, personal calificado que cumpla con el calendario de mantenimientos preventivo, predictivo y correctivo, además se elabora informes diarios de la operación y mantenimiento de la central para obtener un histórico de la operación de la central.

La central Quevedo ejecuta mantenimientos programados cada 2000 horas de operación, se ejecuta el mantenimiento de 6000 horas (medio overhaul) y el mantenimiento de 24000 horas que es un ciclo completo, esto con el fin de proteger los activos y asegurar el correcto funcionamiento de la central. Para cumplir con los ciclos de mantenimiento, se requiere un total de 15 personas para cada ciclo (Tabla 13-4).

**Tabla 13-4.** Personal técnico especializado para mantenimiento parcial y overhaul

Mantenimientos (Ciclos)	Mecánico	Ayudante	Eléctrico	Supervisor Eléctrico	Supervisor Mecánico	Total Personal Técnico	Tiempo (días)
2000	2	2	1	1	1	7	4
6000	2	2	2	1	1	8	7
12000	5	3	2	1	1	12	15
24000	5	3	2	1	1	12	15

Realizado por: Taco E 2022

##### 4.3.2.1 Servicio de taller especializado

Dependiendo del estado de los subsistemas de los motores, se debe realizar el mantenimiento de estos dependiendo del número de horas, tolerancias y estado del material; dependiendo de su estado deberán ser desechados o dados de baja. Estos trabajos se los realizará en el taller especializado que se implementó en la Central Quevedo.

##### 4.3.2.2 Repuestos de mantenimiento

Se realizó el listado de repuestos para mantenimientos programados y stock de seguridad para cubrir mantenimientos correctivos (Tabla 14-4). Los elementos de mayor valor corresponden a los repuestos empleados en el mantenimiento de inyectores, bomba de inyección, bomba de agua, culatas, rines y tobera del turbocargador.

**Tabla 14-4.** Costos de repuestos de acuerdo con el ciclo de mantenimiento.

Costo repuestos mantenimiento 2000H [USD]	<b>18,500.00</b>
Costo repuestos mantenimiento 6000H [USD]	<b>33,832.18</b>
Costo repuestos mantenimiento 24000H [USD]	<b>119,269.92</b>

Realizado por: Taco E 2022

#### 4.3.2.3 Costo del servicio de mantenimiento

En la tabla 15-4 se presenta el costo del personal técnico requerido para realizar mantenimiento y reacondicionamiento partes desgastadas.

**Tabla 15-4.** Personal técnico especializado para mantenimiento parcial y overhaul incluye el reacondicionamiento de repuestos

<b>Horas de mantenimientos</b>	<b>Costo propuesto por motor [USD]</b>
2000	8,029.00
12000	15,000.00

Realizado por: Taco E 2022



De acuerdo con los datos proporcionados por el personal de mantenimiento es posible determinar los elementos críticos de funcionamiento, donde destacan:

**Tabla 1-5.** Fallas frecuentes en la unidad evaluada

Fallos	Fallas frecuentes	Tiempo entre fallas tef (horas)	Tiempo entre reparacion ter (horas)
1	Rotura oring enfriamiento asiento de válvulas	600	45
2	Rotura oring enfriamiento asiento de válvulas	2754	62
3	Desbalanceo turbocargador	1979	312
4	Inyectores obstruidos	945	72
5	Liqueo bomba de combustible	642	32
6	Rotura cañería alimentación combustible	147	17
7	Mal reglaje de cremalleras	158	10
8	Mantenimiento transformador principal	935	232
9	Atascamiento plunger de bomba de inyección	1551	16
10	Atascamiento plunger de bomba de inyección	103	22
11	Atascamiento plunger de bomba de inyección	507	18
12	Inyectores obstruidos	1537	4
13	Rotura tubería flexible aire de carga	7	3
14	Rotura oring enfriamiento asiento de válvulas	2525	48
15	Descalibración bombas de inyección	541	17
16	Vibración alta turbo	46	144
17	Parada de planta	262	216
18	Rotura flexible gases de escape	1735	5
19	Desgaste sello bombas de agua	370	15
20	Rotura tubería de combustible de la bomba de inyección	1135	6
21	Rotura oring enfriamiento asiento de válvulas	429	48
22	Liqueo	696	46
23	Retorno combustible obstruido	1588	18
24	Retorno combustible obstruido	412	8
25	Fuga de combustible por filtro dúplex	1746	6
26	Limpieza de válvulas de purificación de aceite	2930	48
27	Inyectores obstruidos	260	18
28	Tramo de leva	465	70

Fuente: CELEC EP (2016)

Realizado por: Taco T (2022)

De la Tabla 1-5 se puede extraer que el elemento que más tiempo ha demorado en retomar su disponibilidad es el turbocargador, seguido por el transformador principal y problemas de vibración del turbo.

## **5.2 Estrategias y acciones de mantenimiento para mejorar los indicadores de disponibilidad y confiabilidad**

Disponibilidad y confiabilidad son términos que forman parte de la cotidianidad actual de un proceso de generación de energía eléctrica. Para ello se debe garantizar la disponibilidad de funcionamiento de las unidades e instalaciones de tal modo que permitan atender el proceso de producción. En la actualidad las centrales térmicas se encuentran inmersas en el mejoramiento y optimización de los índices, a partir de la introducción de nuevas técnicas de mantenimiento y diagnóstico.

De acuerdo con el análisis realizado en el capítulo anterior, se puede establecer que este trabajo reviste de gran importancia, mismo que se encuentra enmarcado en el análisis RAM-CDM de las unidades de generación, y de esta manera establecer estrategias y acciones de mantenimiento, aplicando técnicas de diagnóstico integral, utilizando herramientas como el análisis causa raíz, análisis de modos de fallo, mantenimiento basado en condición, mantenimiento programado y otras.

Entre las estrategias que se ha aplicado en la Central Quevedo para mejorar los índices de disponibilidad y confiabilidad se ha realizado lo siguiente:

- Implementación de la técnica del diagnóstico integral en la central mediante la aplicación de herramientas como análisis basado en condición y metodologías predictivas.
- Implementación de un taller especializado con máquina y herramientas para el reacondicionamiento de elementos de los motores de combustión interna.
- Gestión óptima en la *compra de herramientas* especiales para mantenimiento.

### **5.2.1 Diagnóstico integral**

La utilización de técnicas predictivas y correctivas utilizadas de forma adecuada, son herramientas que permiten conocer y elevar la disponibilidad y confiabilidad de los motores objeto de estudio del presente trabajo. El diagnóstico se realiza para identificar fallas en estado incipiente, e intervenir para eliminar el fallo potencial que no complete el ciclo acordado de trabajo.

El diagnóstico es el conjunto de mediciones y análisis que se realizan con el objetivo de evaluar el estado del equipo, para detectar averías potenciales y desviaciones de parámetros de régimen, e intervenir a tiempo el equipo, manteniendo la operación del motor bajo condiciones controladas.

Para la aplicación del diagnóstico integral se requiere de una alta cultura de operación, mantenimiento y capacitación del personal. Esto significa que todo el personal que trabaja en la Central entienda y actúe en función de la seguridad, disponibilidad y mantenibilidad de esta; que la instalación se mantenga limpia y organizada; que el personal actúe de acuerdo con la responsabilidad que tiene para con el sistema; que el personal de operaciones y mantenimiento estén constantemente inspeccionando, revisando y accionando para mantener la Central. El personal de operaciones debe llenar los registros, operar según las instrucciones, no desviar su atención del control de la operación, no violar un mantenimiento tanto de equipos principales como auxiliares, y nunca operar un equipo con parámetros fuera del rango establecido.

En el diagnóstico participan todas las áreas involucradas y es responsabilidad de la Central concentrar todos estos análisis y propuestas de soluciones en un solo lugar para la toma de decisiones; dedicando a esto los recursos humanos necesarios, la planificación exhaustiva, el control necesario que posibiliten el cumplimiento periódico de las mediciones y análisis correspondiente, llegando a la causa raíz de las desviaciones y así obtener la disponibilidad esperada.

La implementación del sistema de diagnóstico implica un estricto cumplimiento, ya que se basa en el análisis de la información que el mismo personal proporciona. No obstante, el sistema requiere de algunas reglas propias de cada actividad, que presuponen la introducción de una metodología de aplicación, registro, análisis y síntesis, mediante los documentos adecuados para cada caso.

Existen un grupo de mediciones adicionales a las previstas por el fabricante, que se pueden implementar como apoyo al análisis de las condiciones de operación del equipo, dentro de estas se pueden encontrar, la presión del cárter, el diferencial de presión del turbo-cargador, el nivel de liqueo en las bombas de inyección del motor, las pruebas de rendimiento de aceite y de combustible, estanqueidad de los cilindros, medición de la compresión, las mediciones adicionales a los tanques de drenaje de los MDU, entre otras.

La actividad de diagnóstico implementado en la Central Quevedo II, permite establecer metas y objetivos más elevados tales como: una operación controlada de las unidades de generación, desarrollar un acervo cultural en la política del trabajo limpio y organizado, así como la profesionalidad en cada tarea ejecutada, de forma que garantice una confiabilidad de excelencia.

De igual modo el manual posibilita usar al máximo el equipamiento de máquinas herramientas que se ha puesto en los talleres.

### **5.2.2 Taller para reacondicionamiento de partes de motores de combustión interna**

El taller de reparación y reacondicionamiento de partes de MCI de la Central Quevedo II, representa un hito importante dentro de la gestión del mantenimiento ya que es necesario conocer las características y el estado de las unidades de generación con el fin de determinar el volumen de trabajo que se ejecutara en los mantenimientos cíclicos y determinar el flujo de trabajo a realizar en los equipos del taller y con ello optimizar tiempo y recursos en la ejecución de estas tareas.

Como resultado de la utilización de estos equipos en el mantenimiento programado se puede obtener reducción de costos por reutilización de repuestos, establecer frecuencias de mantenimiento óptimas y ejecutar estrategias de mantenimiento que funcionen bajo un marco de confiabilidad y manejo del riesgo preestablecido.

Para garantizar la disponibilidad de los motores y tener una mayor confiabilidad en la producción de energía dentro las estrategias operativas, la Gerencia de la Unidad CELEC EP Termopichincha ha implementado un Taller Mecánico especializado para atender los programas de mantenimiento de la Central y brindar apoyo a las otras Centrales de Generación equipadas con motores similares, optimizando recursos, costos y tiempo en el cumplimiento de los programas.

El taller cuenta con procedimientos y estándares de calidad ya que dispone de técnicos altamente capacitados con herramientas e instrumentos acorde a la actualidad y exigencias de las unidades de este tipo de generación.

El taller mecánico está en capacidad de realizar los siguientes trabajos específicos como:

- Bruñido de camisas
- Rectificación de válvulas
- Rectificación de asientos
- Balanceo de rotores de turbocargadores
- Rectificación de camisas
- Rectificación de asientos de cabezotes
- Rectificación de cuerpos de las válvulas de bombas de inyección.
- Rectificación de cuerpos de inyector
- Calibración de inyectores

- Calibración de bombas de inyección

El personal de mantenimiento con apoyo del taller especializado está capacitado para realizar mantenimientos menores, mayores y dar soporte en rehabilitación completa de unidades de generación.

### 5.2.3 Gestión en la compra de equipos

Una parte importante del motor es el sobrealimentador de aire, ya que influye de manera directa en la eficiencia del mismo, el mantenimiento de estos se ha vuelto crítico en especial en las centrales que cuenta con muchos turbocargadores en funcionamiento, por tal razón y en vista del número de turbos con los que cuenta la Central, se decidió implementar un centro especializado propio que permita atender las necesidades de mantenimiento de estos equipos. El proceso de balanceo se realiza bajo la norma ISO 1940/1 (Figura 2-5).



**Figura 2-5.** Equipo de balanceo dinámico

Fuente: Taco, E. (2022)

Con la implementación del taller especializado y el equipamiento con máquinas herramientas para la ejecución de las tareas de mantenimiento, se reducen considerablemente la dependencia de realizar trabajos de mantenimiento externos y, además se promueve la cultura de mantenimiento predictivo-preventivo. Además, existe una reducción de los tiempos de ejecución de los trabajos preventivos por el uso del taller especializado.

### 5.3 Beneficios / reducción de costos para CELEC EP

Hasta la presente fecha la central Quevedo ha ejecutado trabajos de mantenimiento de rectificación, bruñido de las camisas y balanceo de ejes de turbocargadores, tanto para centrales propias como Quevedo II, Galápagos y Sacha; así como a centrales a cargo de otras Unidades de Negocio.

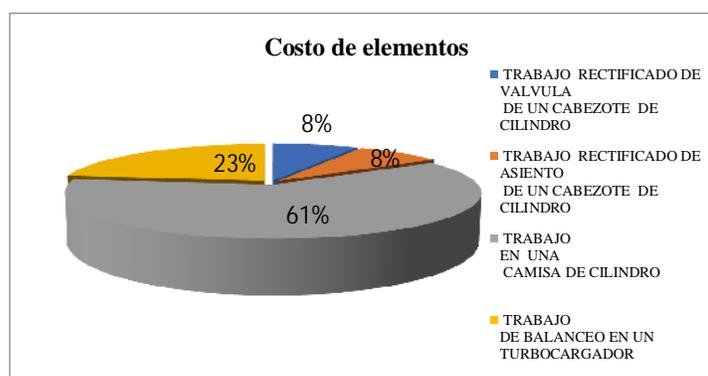
En el siguiente cuadro se puede visualizar los costos de estos servicios por empresas externas que lo realizan y cuál sería el costo involucrado en contratar los mismos para cada mantenimiento en caso de no disponer de estos equipos (Tabla 2-5). Ya que la central dispone de un total de 60 unidades el costo total sería de **1,031,400.00 USD** considerando mantenimientos de 6000, 18000, y 30000 horas.

**Tabla 2-5.** Costo de actividades de reacondicionamiento de partes que se realizan en el taller por mantenimientos

Actividades en taller	Costo unitario por 1 elemento (valor referencial en el mercado)[USD]	Cantidad por motor	Costo total por número de elementos del motor [USD]
Trabajo de rectificado de válvula de un cabezote de cilindro	15.00	36	540.00
Trabajo de rectificado de asiento de un cabezote de cilindro	15.00	36	540.00
Trabajo de bruñido en una camisa de cilindro	350.00	9	3,150.00
Trabajo de balanceo en un turbocargador	1,500.00	1	1,500.00
<b>Costo de reacondicionamiento por 1 motor</b>			<b>5,730.00</b>

Fuente: CELEC EP (2016)  
Realizado por: Taco T (2022)

Además, se puede evidenciar que el elemento de mayor valor a la hora de realizar mantenimiento externo es para el trabajo de una camisa de cilindro (Figura 3-5).



**Figura 3-5.** Costos de mantenimiento

Realizado por: Taco, E. (2022)

En consecuencia, se tiene que gracias a la implementación del taller para reacondicionamiento de partes de motores de combustión interna y la adquisición del equipo de balanceo dinámico se genera un ahorro de 5,730.0USD por cada motor.

#### 5.4 Índices de mantenimiento 2017

Una vez aplicadas las estrategias de mantenimiento recomendadas en el presente trabajo de investigación, se mejoró la eficiencia global de la Central Termoeléctrica Quevedo II.

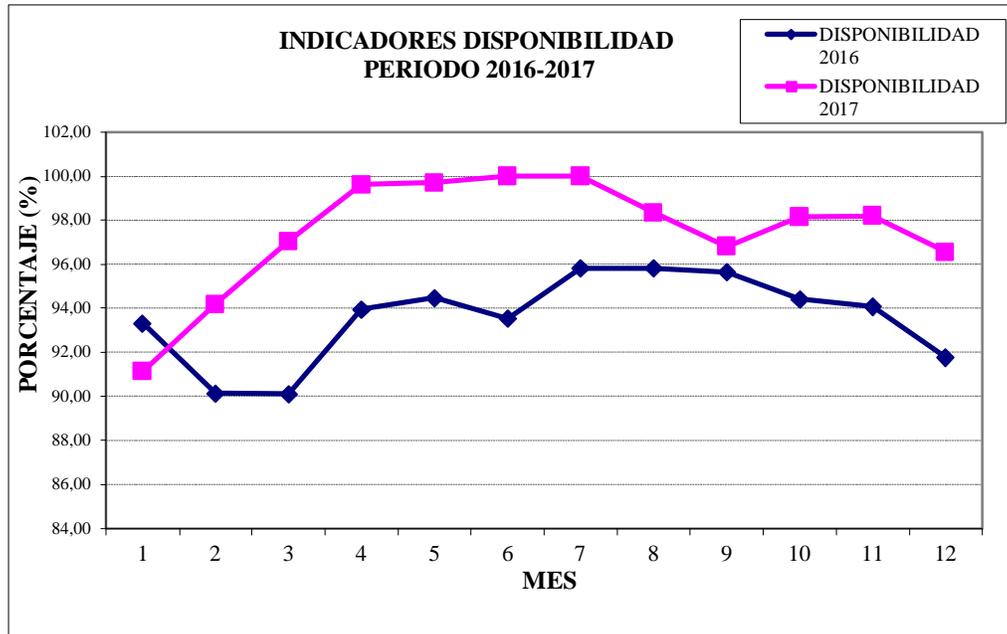
La operación de centrales de generación de electricidad emplea una gran variedad de recursos que abarcan desde sofisticados equipos de medida, a potentes equipos utilizados para reacondicionamiento de partes. Se capacitó a los responsables de mantenimiento de la central Quevedo en una formación multidisciplinar en temas técnicos, económicos, de calidad, etc. Para mejorar los planes y procesos de generación para alcanzar los valores óptimos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad en el año 2017.

A continuación, en la tabla 3-5 y figura 4-5 se presenta los datos de disponibilidad correspondiente del año 2017, en donde se puede apreciar el incremento de 3,89% con relación al año 2016. En el anexo D se puede apreciar el reporte final de donde proviene los datos como ejemplo el valor de disponibilidad obtenido del mes de octubre 2016.

**Tabla 3-5.** Valores de disponibilidad año 2016-2017

<b>CENTRAL TERMOELÉCTRICA QUEVEDO</b>			
<b>INDICE PERIODO 2016-2017</b>			
	<b>MES</b>	<b>DISPONIBILIDAD 2016 (%)</b>	<b>DISPONIBILIDAD 2017 (%)</b>
<b>1</b>	ENERO	93,33	91,13
<b>2</b>	FEBRERO	90,14	94,19
<b>3</b>	MARZO	90,12	97,05
<b>4</b>	ABRIL	93,95	99,63
<b>5</b>	MAYO	94,46	99,71
<b>6</b>	JUNIO	93,53	100
<b>7</b>	JULIO	95,83	100
<b>8</b>	AGOSTO	95,83	98,35
<b>9</b>	SEPTIEMBRE	95,64	96,82
<b>10</b>	OCTUBRE	94,41	98,16
<b>11</b>	NOVIEMBRE	94,09	98,21
<b>12</b>	DICIEMBRE	91,76	96,56
	<b>PROMEDIO</b>	<b>93,59</b>	<b>97,48</b>

Fuente: CELEC EP (2016)  
Realizado por: Taco T (2022)



**Figura 4-5.** Indicadores de disponibilidad – periodo 2016-2017

Realizado por: CELEC EP. (2018)

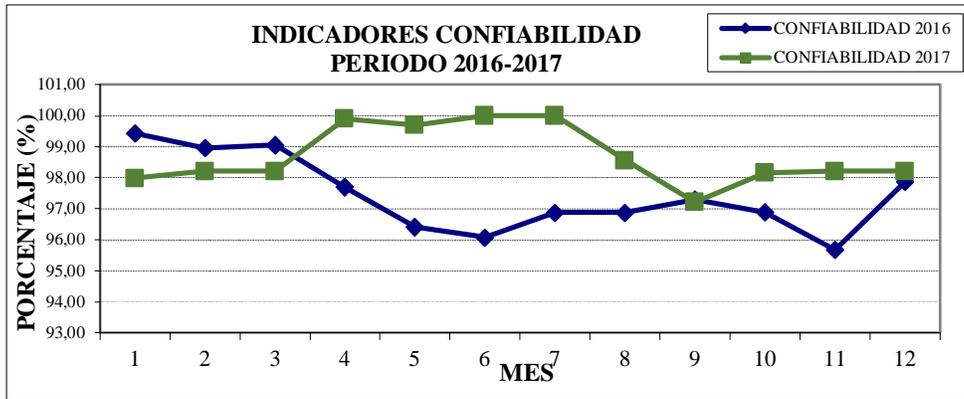
En la tabla 3-6 y figura 5-5 se presenta los datos obtenidos de confiabilidad correspondiente del año 2017, en donde se puede apreciar el incremento de 1,27% con relación al año 2016.

**Tabla 4-5.** Valores de confiabilidad año 2016-2017

CENTRAL TERMOELÉCTRICA QUEVEDO			
INDICE PERIODO 2016-2017			
	MES	CONFIABILIDAD 2016 (%)	CONFIABILIDAD 2017 (%)
1	ENERO	99,43	97,98
2	FEBRERO	98,96	98,21
3	MARZO	99,06	98,21
4	ABRIL	97,70	99,9
5	MAYO	96,41	99,71
6	JUNIO	96,07	100
7	JULIO	96,88	100
8	AGOSTO	96,88	98,56
9	SEPTIEMBRE	97,29	97,22
10	OCTUBRE	96,89	98,16
11	NOVIEMBRE	95,67	98,21
12	DICIEMBRE	97,88	98,21
	<b>PROMEDIO</b>	<b>97,43</b>	<b>98,70</b>

Fuente: CELEC EP (2016)

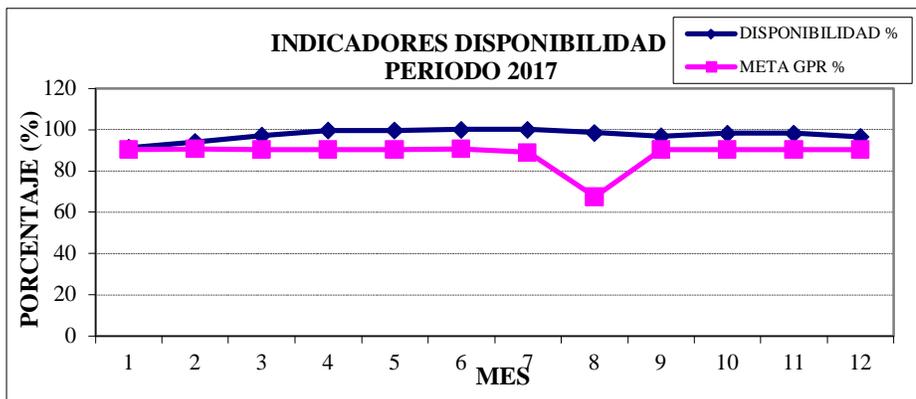
Realizado por: Taco T (2022)



**Figura 5-5.** Indicadores de confiabilidad – periodo 2016- 2017

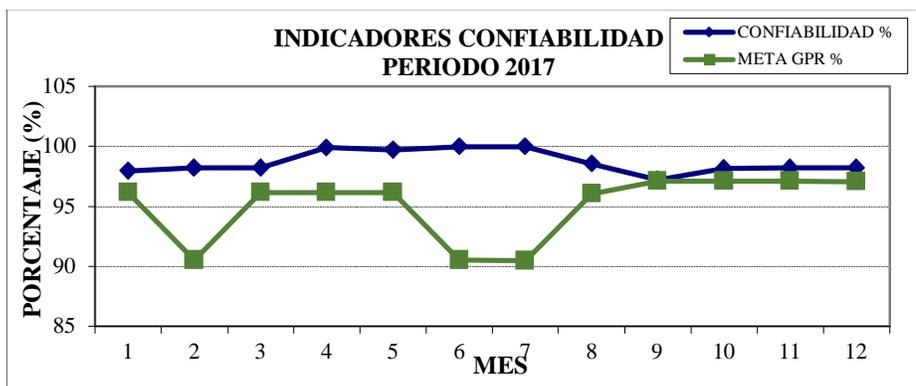
Realizado por: CELEC EP. (2018)

En el anexo E se adjunta los datos que fueron ingresados en la página GPR (Gobierno por Resultados) donde se visualiza los resultados mensuales de disponibilidad y confiabilidad obtenidos en los meses del año 2017 correspondiente a la Central Termoeléctrica Quevedo II. En las figuras 6-5 y 7-5 se presenta los resultados obtenidos.



**Figura 6-5.** Indicadores de disponibilidad – periodo 2017

Realizado por: CELEC EP. (2018)



**Figura 7-5.** Indicadores de confiabilidad – periodo 2017

Realizado por: CELEC EP. (2018)

Por tanto, es posible afirmar que se ha cumplido con la hipótesis planteada inicialmente ya que las estrategias de mantenimiento aplicadas a las unidades de generación Hyundai de la Central Termoeléctrica Quevedo II, incrementaron los indicadores de confiabilidad y disponibilidad.

## CONCLUSIONES

Se evaluaron los índices de acuerdo con la norma IEC 61703. Para la confiabilidad, analíticamente se obtuvo un valor de 93.71 %, 82.57 % de disponibilidad y 26.48 de mantenibilidad.

Aplicadas las estrategias de mantenimiento recomendadas, se obtuvo un índice de disponibilidad de 97.48% y un índice de confiabilidad de 98.70%. Validando así la hipótesis propuesta inicialmente.

Aplicando la distribución de Weibull se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.98 para modelar los datos entregados por el área de mantenimiento, los valores obtenidos de confiabilidad y mantenibilidad fueron de 94.25% y 5.75 % respectivamente.

Se identificaron los elementos recurrentes de fallo que impactan de manera directa en la baja mantenibilidad de la planta, denotando la necesidad de contar con un taller especializado para la recuperación de elementos, mantenimiento de turbocargador, y un equipo de balanceo dinámico.

El análisis estadístico realizado concuerda con los valores entregados por el equipo de mantenimiento de la Central Quevedo II, además, de acuerdo con la hoja de especificaciones técnicas provista por el fabricante se indica que la disponibilidad de cada unidad supera el 88%.

## **RECOMENDACIONES**

Capacitar al personal sobre la importancia de cumplir con los planes de mantenimiento y establecer una cultura de mejora continua.

Verificar los indicadores de mantenimiento periódicamente, a fin de monitorear y controlar el funcionamiento de la planta.

Considerar las recomendaciones del fabricante, para alargar la vida útil de sus sistemas y elementos internos.

Planificar en periodos anuales o menores la adquisición de repuestos y elementos susceptibles de fallo para tener stock de seguridad que agilicen la puesta en marcha de cada unidad de generación.

Utilizar programas o software de mantenimiento de acuerdo con el alcance de las actividades de mantenimiento y organización de la empresa.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barabadi, A., Gudmestad, O. T., & Barabady, J.** (2015). RAMS data collection under Arctic conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 135, 92-99.
- Barberá, L., Crespo, A., Viveros, P., & Kristjanpoller, F.** (2012). RAM analysis of mining process: a case study of a Copper Smelting Process in the field of mining, Chile. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(31), 217-222.
- Billinton, R., & Allan, R. N.** (1988). *Reliability assessment of large electric power systems*, ser. Power Electronics and Power Systems. Springer.
- Carlier, S., Coindoz, M., Deneuille, L., Garbellini, L., & Altavilla, A.** (1996). Evaluation of reliability, availability, maintainability and safety requirements for manned space vehicles with extended on-orbit stay time. *Acta astronautica*, 38(2), 115-123.
- Carnero, M.** (2006). An evaluation system of the setting up of predictive maintenance programmes. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(8), 945-963.
- Cha, S. T., Jeon, D. H., Bae, I. S., & Lee, I. R.** (2004, September). Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects. In *2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* (pp. 451-456). IEEE.
- Cheng, Z., Jia, X., Gao, P., Wu, S., & Wang, J.** (2008). A framework for intelligent reliability centered maintenance analysis. *Reliability engineering & system safety*, 93(6), 806-814.
- Corvaro, F., Giacchetta, G., Marchetti, B., & Recanati, M.** (2017). Reliability, Availability, Maintainability (RAM) study, on reciprocating compressors API 618. *Petroleum*, 3(2), 266-272.
- De Sanctis, I., Paciarotti, C., & Di Giovine, O.** (2016). Integration between RCM and RAM: a case study. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(6), 852-880.
- Díaz, V. G., Martínez, L. B., & Márquez, A. C.** (2010). Practical application of a RAMS analysis for the improvement of the warranty management. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(3), 50-55.
- EIA.** Country Analysis Brief: Ecuador. *Eia US Energy Inf Adm* 2019;2019:1-12.
- Elevli, S., Uzgoren, N., & Taksuk, M.** (2008). Maintainability analysis of mechanical systems of electric cable shovels.
- Eti, M. C., Ogaji, S. O. T., & Probert, S. D.** (2007). Integrating reliability, availability, maintainability and supportability with risk analysis for improved operation of the Afam thermal power-station. *Applied Energy*, 84(2), 202-221.
- Gabbar, H. A., Yamashita, H., Suzuki, K., & Shimada, Y.** (2003). Computer-aided RCM-based plant maintenance management system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 19(5), 449-458.

- Hipkin, I. B., & De Cock, C.** (2000). TQM and BPR: lessons for maintenance management. *Omega*, 28(3), 277-292.
- Hyundai.** (2021). Engine and machinery – Optimized power solutions.
- IEC 60300-3-5.** Dependability management. Part 3-5: Application guide: Reliability test conditions and statistical test principles.
- IEC 60300-3-11.** Dependability management. Part 3-11: Application guide: Reliability centred maintenance.
- IEC 61703.** Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability, and maintenance support terms.
- Kennedy, R.** (2005). Examining the Processes of RCM and TPM. The Plant Maintenance Resource Center, The Centre for TPM (Australasia).
- Lundteigen, M. A., Rausand, M., & Utne, I. B.** (2009). Integrating RAMS engineering and management with the safety life cycle of IEC 61508. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(12), 1894-1903.
- Mokashi, A. J., Wang, J., & Vermar, A. K.** (2002). A study of reliability-centred maintenance in maritime operations. *Marine Policy*, 26(5), 325-335
- Moubray, J.** (2001). Reliability-centered maintenance. Industrial Press Inc.
- O'Connor, P., & Kleyner, A.** (2012). Practical reliability engineering. John Wiley & Son.
- Rao, P. K., & Balasubramanya, K. S.** (1986). RAM analysis of a navigational system by Markov technique: A case study. *Microelectronics Reliability*, 26(3), 447-451.
- Rausand, M.** (1998). Reliability centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 60(2), 121-132.
- Sharma, S. P., & Kumar, D.** (2010). RAM analysis of repairable industrial systems utilizing uncertain data. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1208-1221.
- Swanson, L.** (2001). Linking maintenance strategies to performance. *International journal of production economics*, 70(3), 237-244.
- Zhou, X., Xi, L., & Lee, J.** (2007). Reliability-centered predictive maintenance scheduling for a continuously monitored system subject to degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(4), 530-534.

## **ANEXOS**

**Anexo A REGISTRO DE FALLAS**

<b>N. Fallos</b>		<b>TIEMPO ENTRE FALLAS TEF (HORAS)</b>	<b>TIEMPO ENTRE REPARACION TER (HORAS)</b>
1	ROTURA ORING ENFRIAMIENTO ASIENTO DE VALVULAS	600	45
2	MANTENIMIENTO 6000 HORAS	1454	432
3	ROTURA ORING ENFRIAMIENTO ASIENTO DE VALVULAS	1300	62
4	MANTENIMIENTO 8000 HORAS	936	145
5	DESBALANCEO TURBOCARGADOR	1043	312
6	INYECTORES OBSTRUIDOS	945	72
7	MANTENIMIENTO 12000 HORAS	28	2760
8	LIQUEO BOMBA DE COMBUSTIBLE	614	32
9	ROTURA CAÑERIA ALIMENTACION COMBUSTIBLE	147	17
10	MAL REGLAJE DE CREMALLERAS	158	10
11	REAJUSTES 200 HORAS	862	15
12	MANTENIMIENTO TRANSFORMADOR PRINCIPAL	73	232
13	MANTENIMIENTO 14000 HORAS	567	115
14	ATASCAMIENTO PLUNGER DE BOMBA DE INYECCION	984	16
15	ATASCAMIENTO PLUNGER DE BOMBA DE INYECCION	103	22
16	ATASCAMIENTO PLUNGER DE BOMBA DE INYECCION	507	18
17	MTTO 16000 HORAS	1498	48
18	INYECTORES OBSTRUIDOS	39	4
19	ROTURA TUBERIA FLEXIBLE AIRE DE CARGA	7	3
20	MTTO 18000 HORAS	1425	58
21	ROTURA ORING ENFRIAMIENTO ASIENTO DE VALVULAS	1100	48
22	DESCALIBRACION BOMBAS DE INYECCION	541	17
23	VIBRACION ALTA TURBO	46	144
24	PARADA DE PLANTA	262	216
25	MTTO 20000 HORAS	1053	120
26	ROTURA FLEXIBLE GASES DE ESCAPE	682	5
27	DESGASTE SELLO BOMBAS DE AGUA	370	15
28	ROTURA TUBERIA DE COMBUSTIBLE DE LA BOMBA DE INYECCION	1135	6
29	MTTO 22000 HORAS	71	72
30	ROTURA ORING ENFRIAMIENTO ASIENTO DE VALVULAS	358	48

31	LIQUEO	696	46
32	MTTO 24000 HORAS	781	312
33	RETORNO COMBUSTIBLE OBSTRUIDO	807	18
34	RETORNO COMBUSTIBLE OBSTRUIDO	412	8
35	MTTO 26000 HORAS	991	64
36	FUGA DE COMBUSTIBLE POR FILTRO DUPLEX	755	6
37	MTTO 28000 HORAS	1202	72
38	MTTO 30000 HORAS	1205	120
39	PINTADO	170	48
40	LIMPIEZA DE VALVULAS DE PURIFICACION DE ACEITE	353	48
41	INYECTORES OBSTRUIDOS	260	18
42	TRAMO DE LEVA	465	70
43	MTTO 32000 HORAS	1474	72

<b>Motor N.60</b>	
<b>Año</b>	<b>Numero de Fallos</b>
2012	6
2013	10
2014	11
2015	9
2016	7
<b>Total fallos</b>	<b>43</b>

## Anexo B RESULTADOS RAM

Fórmulas empleadas:	
$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}}$	
$A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$	
$M(t) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-\frac{t}{MTTF}}$	
$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de funcionamiento}}{\text{Número de fallas}}$	
$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparación}}{\text{Número de fallas}}$	
Resultados:	
MTBF	662,30
MTTR	139,79
<b>Confiabilidad</b>	93,71%
<b>Disponibilidad</b>	82,57%
<b>Mantenibilidad</b>	26,48%

## Anexo C RESULTADOS ESTADÍSTICOS MINITAB

Los softwares de análisis estadístico son programas especializados diseñados para permitir a los usuarios realizar análisis estadísticos complejos. Estos productos suelen proporcionar herramientas para la organización, interpretación y presentación de conjuntos de datos seleccionados. Las soluciones estadísticas suelen empaquetar estas capacidades de gestión de datos con funciones específicas para el análisis estadístico. Las capacidades de análisis estadístico se refieren a las capacidades que admiten metodologías de análisis como el análisis de regresión, el análisis predictivo y el modelado estadístico, entre muchos otros.

En ese sentido Minitab es uno de los softwares más potentes en el mercado. Minitab ofrece visualizaciones, análisis estadístico, análisis predictivo y de mejora para permitir la toma de decisiones basada en datos. Durante casi 50 años, Minitab ha ayudado a empresas e instituciones a detectar tendencias, resolver problemas y descubrir información valiosa en los datos mediante la entrega de un conjunto integral y el mejor en su clase de herramientas de análisis de datos y mejora de procesos. Combinado con una facilidad de uso incomparable, Minitab hace que sea más simple que nunca obtener conocimientos profundos de los datos. Miles de empresas de todos los tamaños e industrias en todo el mundo, usan y confían en Minitab para tomar decisiones mejores, más rápidas y precisas para impulsar la excelencia empresarial. También es ampliamente usado en la Academia, donde diversas universidades alrededor de mundo lo usan.

**Tabla C1.** Calidad de ajuste (Goodness-of-Fit)

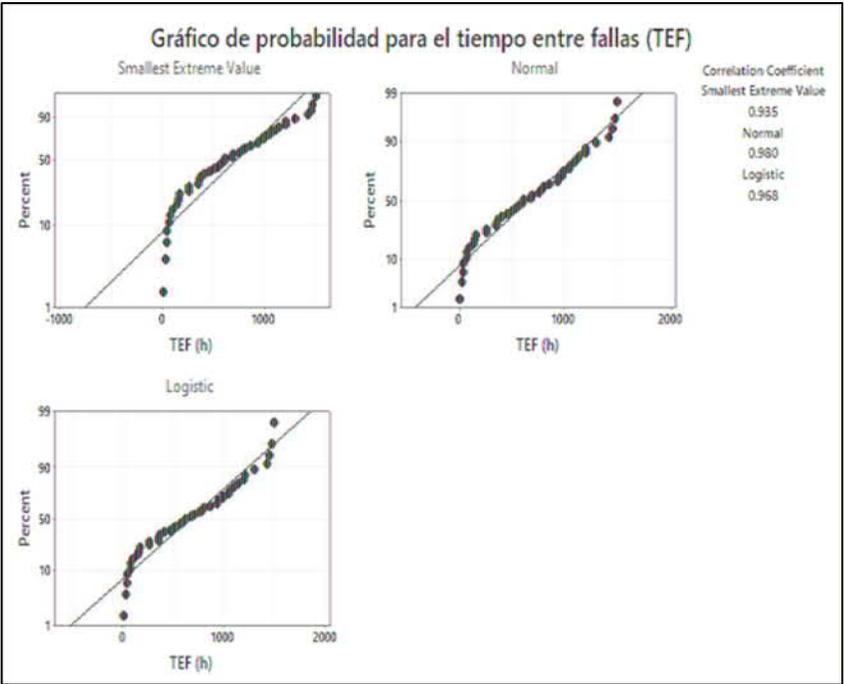
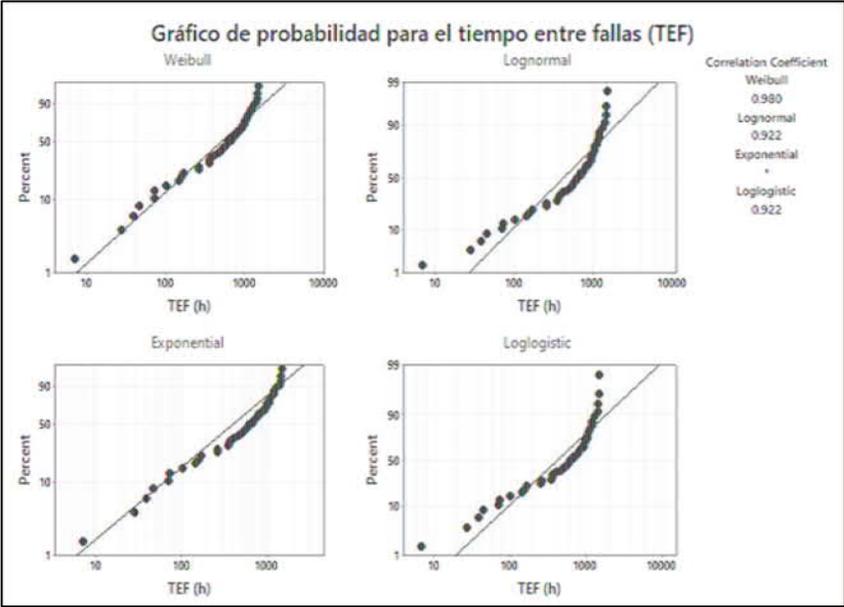
Distribution	Anderson-Darling (adj)	Correlation Coefficient
Weibull	1.167	0.980
Lognormal	2.378	0.922
Exponential	3.048	*
Loglogistic	2.480	0.922
3-Parameter Weibull	0.966	0.983
3-Parameter Lognormal	0.790	0.981
2-Parameter Exponential	3.199	*
3-Parameter Loglogistic	1.079	0.969
Smallest Extreme Value	2.447	0.935
Normal	0.813	0.980
Logistic	1.077	0.968

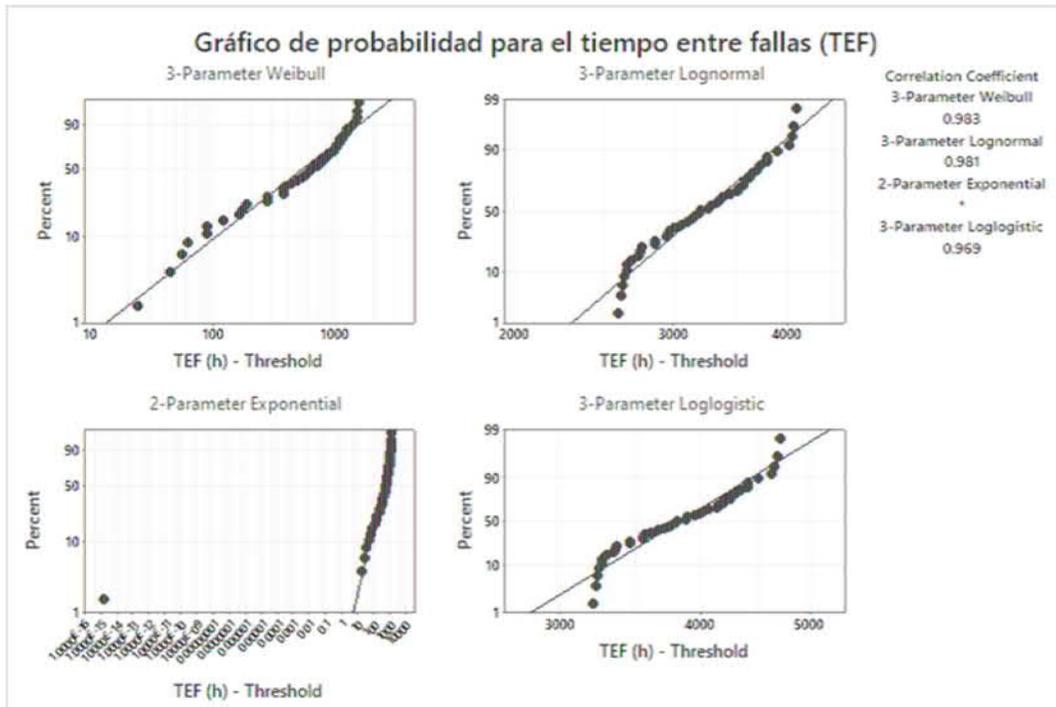
**Tabla C2.** Resultados de percentiles

Distribution	Percent	Percentile
Weibull	1	7.26206
Lognormal	1	26.7290
Exponential	1	5.78000
Loglogistic	1	19.3580
3-Parameter Weibull	1	-3.70896
3-Parameter Lognormal	1	-279.189
2-Parameter Exponential	1	12.7417
3-Parameter Loglogistic	1	-380.318
Smallest Extreme Value	1	-765.572
Normal	1	-416.588
Logistic	1	-528.306
Weibull	5	37.2374
Lognormal	5	59.8162
Exponential	5	29.4990
Loglogistic	5	58.3691
3-Parameter Weibull	5	38.9035
3-Parameter Lognormal	5	-42.9413
2-Parameter Exponential	5	36.3036
3-Parameter Loglogistic	5	-50.6243
Smallest Extreme Value	5	-189.661
Normal	5	-100.532
Logistic	5	-100.610
Weibull	10	76.6475
Lognormal	10	91.9001
Exponential	10	60.5934
Loglogistic	10	96.1962
3-Parameter Weibull	10	87.9883
3-Parameter Lognormal	10	92.6677
2-Parameter Exponential	10	67.1919
3-Parameter Loglogistic	10	111.011
Smallest Extreme Value	10	64.6758
Normal	10	67.9570
Logistic	10	92.9953
Weibull	50	506.994
Lognormal	50	418.009
Exponential	50	398.633
Loglogistic	50	418.009
3-Parameter Weibull	50	527.383
3-Parameter Lognormal	50	631.009
2-Parameter Exponential	50	402.991
3-Parameter Loglogistic	50	635.901
Smallest Extreme Value	50	730.298
Normal	50	662.302
Logistic	50	662.302

**Table C3.** Tiempo medio de falla (MTTF)

Distribution	Mean
Weibull	733.11
Lognormal	840.56
Exponential	575.11
Loglogistic	1017.51
3-Parameter Weibull	697.16
3-Parameter Lognormal	663.82
2-Parameter Exponential	578.29
3-Parameter Loglogistic	664.30
Smallest Extreme Value	655.85
Normal	662.30
Logistic	662.30





**Figura C1.** Resultados de cada función de ajuste



Pontificia Universidad Católica  
 Dirección de Informática

---

**Minitab – Licencia Individual**

**INSTALACIÓN MINITAB 19 (VERSIÓN WINDOWS/MAC)**

- 1.- Descargar la licencia de la opción Minitab.lic
- 2.- Descargar Minitab 19 de
  - 64 bits  
<https://files3.minitab.com/prodinstalls/minitab/minitab19/19.1.1.0/win/commercial/x64/minitab19.1.1.0setup.x64.exe>
  - 32 bits  
<https://files3.minitab.com/prodinstalls/minitab/minitab19/19.1.1.0/win/commercial/x86/minitab19.1.1.0setup.x86.exe>
  - Mac  
<https://files3.minitab.com/prodinstalls/minitab/minitab19/19.1.0.0/mac/massdeploy/Minitab.v19.1.0.0.zip>
- 3.- Instalar escogiendo el idioma, aceptando los términos del contrato, en tipo de licencia escoger “Licencia de usuarios múltiples con un servidor o archivo de licencia”, en servidor de licencia escoger “localhost”, escoger ubicación de la instalación y proceder a Instalar.
- 4.- Ejecutar Minitab y al pedir la ubicación del archivo de licencia, asignar la descargada en el paso 1.



---

#### INSTALACIÓN MINITAB EXPRESS (VERSIÓN WINDOWS/MAC)

1.- Descargar la licencia de la opción Minitab.lic

2.- Descargar Minitab Express de

- Windows

<https://files3.minitab.com/prodinstalls/minitabexpress/minitabexpress1/1.5.3.0/win/multi-user/minitabexpress1.5.3.0multi-usersetup.exe>

- Mac

[https://files3.minitab.com/prodinstalls/minitabexpress/minitabexpress1/1.5.3.0/mac/multi-user/Minitab\\_Express\\_MU\\_v1.5.3.pkg](https://files3.minitab.com/prodinstalls/minitabexpress/minitabexpress1/1.5.3.0/mac/multi-user/Minitab_Express_MU_v1.5.3.pkg)

3.- Instalar aceptando los términos del contrato, en nombre del servidor de licencia escoger "localhost", escoger ubicación de la instalación y proceder a Instalar.

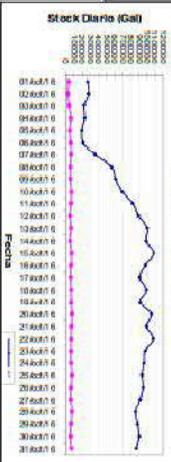
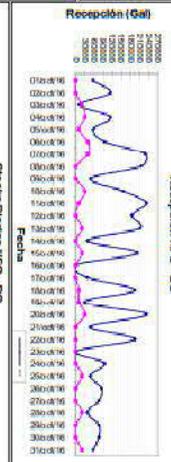
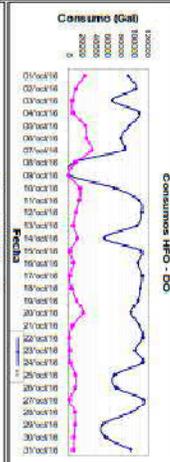
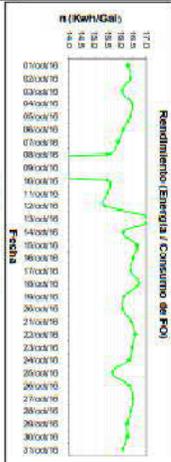
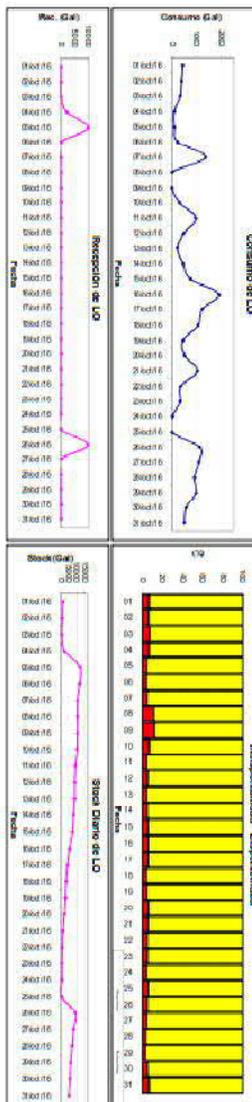
4.- Ejecutar Minitab Express y al pedir la ubicación del archivo de licencia, asignar la descargada en el paso 1.

Anexo D INDICADORES DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD OCT 2016.



INDICADORES PRINCIPALES CENTRAL QUEVEDO 1 OCTUBRE 2016  
 INDICADORES PRINCIPALES CENTRAL  
 TERMOELECTRICA QUEVEDO OCTUBRE 1/2016

Fecha	Energía		Stocks Diarios				Consumos				Recepción				Rend.	Indispon.	Dispon.
	Bruca (MWh)	Neta (MWh)	MFO (GWh)	DO (GWh)	LO (GWh)	MFO (GWh)	DO (GWh)	LO (GWh)	MFO (GWh)	DO (GWh)	LO (GWh)	(%)	(%)	(%)			
01/10/16	1841.30	1744.12	260208.30	31163.70	4207.30	6048.70	24108.10	431.26	6640.00	0	1628	1.69	0.61	23.37	93.19		
02/10/16	1847.64	1729.93	260844.70	24303.30	693.76	10018.60	10202.50	983.82	11290.00	0	1637	1.49	6.19	22.51	93.41		
03/10/16	1837.42	1670.73	229002.40	33723.20	201.20	10044.20	2389.30	332.20	9400	1820	1000	1.20	7.30	22.24	92.03		
04/10/16	1833.90	1720.34	231498.40	61001.30	2400.40	10000.20	6001.90	860.75	11270.00	1894	1042	1.03	0.20	22.37	93.20		
05/10/16	1838.58	1786.00	180726.10	46904.40	13200.20	8111.00	24270.30	90.20	96600	3690	1037	1.01	4.37	22.30	93.43		
06/10/16	1803.25	1802.40	212039.30	59303.30	13002.24	72043.30	20900.30	223.00	94000	3690	1011	0.90	3.90	23.00	93.04		
07/10/16	1840.53	1746.64	200949.20	64982.70	10213.97	82144.10	34131.30	1305.07	22700	35000	1125	4.00	22.00	93.33			
08/10/16	2377.91	273.13	502022.20	542581.70	10253.97	6171.00	10742.20	8200	21274	0	1528	2.00	11.10	21.32	93.52		
09/10/16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47930	28070	0	0.00	2.07	11.30	92.00		
10/10/16	1919.00	1248.52	697286.70	69783.20	10258.60	60817.20	10687.30	884.20	154987	28070	1500	1.04	6.50	22.28	93.18		
11/10/16	1829.72	1777.20	623777.40	61231.70	9304.41	10023.30	10741.30	903.21	231794	3690	1000	1.00	4.10	23.00	93.04		
12/10/16	1820.40	1726.40	697805.90	60077.40	6000.34	10018.50	11103.30	464.07	103720	0	1030	1.27	5.20	22.73	94.22		
13/10/16	1809.00	1770.00	600845.30	63304.70	6008.70	10014.00	6003.30	220.40	210974	18700	1420	1.02	4.20	22.30	93.77		
14/10/16	1809.72	1674.73	592971.40	50490.30	6214.90	10047.40	12863.70	446.20	37800	0	1614	1.20	4.90	22.80	94.01		
15/10/16	1824.62	1728.43	608486.00	68512.90	7464.70	10081.40	1742.10	746.50	203030	18700	1640	1.34	5.90	22.60	94.42		
16/10/16	1824.28	1727.09	601490.00	61903.90	7223.44	10081.90	6007.30	1811.20	0	0	1020	1.39	5.70	22.01	94.21		
17/10/16	1824.00	1726.30	602004.20	60004.10	4324.80	11038.30	1220.40	37000	0	0	1038	1.37	3.70	22.03	94.13		
18/10/16	1829.50	1771.24	603703.90	63251.30	3271.60	11038.00	4103.30	1020.31	182804	3690	1071	0.89	3.20	23.07	94.10		
19/10/16	1829.50	1771.24	617053.10	63252.30	2531.72	10430.00	11945.30	430.50	23210	3030	1019	1.00	4.40	22.34	93.50		
20/10/16	1829.71	1742.73	602181.20	74302.40	2313.41	92417.20	21000.30	510.31	421024	28070	1037	1.40	0.00	22.20	94.00		
21/10/16	1840.28	1743.01	590710.00	69730.40	1207.20	10042.00	2103.30	1020.11	41200	0	1041	1.20	0.00	22.04	94.32		
22/10/16	1829.71	1729.54	607913.00	62700.40	593.24	111343.00	1037.30	303.40	193700	0	1042	1.21	0.00	22.79	94.87		
23/10/16	1829.10	1729.40	607882.20	62543.40	603.31	98444.00	1037.30	303.40	0	0	1043	1.21	0.00	22.79	94.86		
24/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
25/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
26/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
27/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
28/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
29/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
30/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
31/10/16	1844.00	1747.97	602008.90	614008.30	0.00	110902.00	20304.10	17.77	94000	0	1043	0.99	4.11	23.01	94.09		
TOTALES	48408110	40292335	2392048500	1833008500	17989381	17989381	259039630	31799030	1810523	3229026	326410	21873	4101	102.29	94.41		
Provision:	1201.49	1461.16	702824.18	93193.90	6707.32	8314.09	10207.77	303.28	104162	10023	939	1024	0.59	22.23	94.41		



Informe Mensual Indicadores Principales  
 Central Térmica Quevedo  
 Año de Operación

**Anexo E INDICADORES DE DISPONIBILIDAD Y CONFIABILIDAD PERIODO 2017 EN LA PÁGINA GPR (GOBIERNO POR RESULTADOS)**

Menú | Gestión de la Unidad | Objetivos Operativos

**Objetivo:** 4. Incrementar la disponibilidad de las unidades de generación de las centrales de la Unidad de Negocio CELEC EP - Termopichincha MEDIANTE la provisión oportuna de repuestos y correcta ejecución de mantenimientos.

**Fecha de Inicio:** 01/01/2014  
**Fecha de Fin:** 31/12/2017  
**Año:** 2017

**Indicador Discreto**  
**Meta contra Resultado del Periodo**

Mostrar Indicadores de los que es componente

1. Definición | 2. Configuración | 3. Metas / Simulador | 4. Resultados | 5. Archivos Anexos

Año: 2017      Valor Inicial: 0

**Indicador:** 4.6. Índice de disponibilidad Central Quevedo II

Periodo	Meta del Periodo	Resultado del Periodo	Avance al Periodo	Estado
1. Enero	90.49	91.13	100.71 %	●
2. Febrero	90.54	94.19	104.03 %	●
3. Marzo	90.26	97.05	107.52 %	●
4. Abril	90.49	99.63	110.10 %	●
5. Mayo	90.49	99.71	110.19 %	●
6. Junio	90.54	100	110.45 %	●
7. Julio	88.92	100	112.46 %	●
8. Agosto	67.55	98.35	145.60 %	●
9. Septiembre	90.36	96.82	107.15 %	●
10. Octubre	90.36	98.16	108.63 %	●
11. Noviembre	90.36	98.21	108.69 %	●
12. Diciembre	90.36	96.56	106.86 %	●

**Comentario**

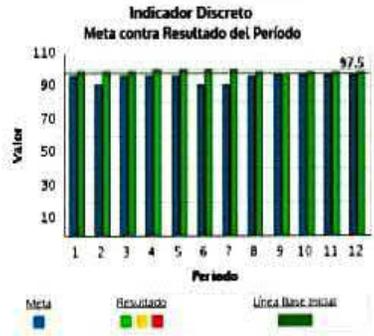
ENERO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 FEBRERO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 MARZO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 ABRIL 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 MAYO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 JUNIO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 JULIO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 AGOSTO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado

**Fecha de última actualización:** 03/01/2018 ( dd/mm/aaaa )  
**Modificado por:** Lasulza Navarrete, Javier (0713558078)

Regresar      Aceptar

Objetivo: 5. Incrementar la confiabilidad de las centrales de generación de la Unidad de Negocio CELEC EP - Termopichincha MEDIANTE el desarrollo e implementación del sistema SCADA y la optimización de la ejecución de los mantenimientos correctivos.

Fecha de Inicio: 01/01/2014  
 Fecha de Fin: 31/12/2017  
 Año: 2017 ▼



Mostrar Indicadores de los que es componente

- 1. Definición
- 2. Configuración
- 3. Metas / Simulador
- 4. Resultados
- 5. Archivos Anexos

Año: 2017

Valor Inicial: 0

Indicador: 5.6. Índice de confiabilidad Central Quevedo II

Periodo	Meta del Periodo	Resultado del Periodo	Avance al Periodo	Estado
1. Enero	96.18	97.98	101.87 %	●
2. Febrero	90.54	98.21	108.47 %	●
3. Marzo	96.18	98.21	102.11 %	●
4. Abril	96.18	99.9	103.87 %	●
5. Mayo	96.18	99.71	103.67 %	●
6. Junio	90.54	100	110.45 %	●
7. Julio	90.49	100	110.51 %	●
8. Agosto	96.08	98.56	102.58 %	●
9. Septiembre	97.13	97.22	100.09 %	●
10. Octubre	97.12	98.16	101.07 %	●
11. Noviembre	97.11	98.21	101.13 %	●
12. Diciembre	97.1	98.21	101.14 %	●

Comentario

ENERO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 FEBRERO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 MARZO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 ABRIL 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 MAYO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 JUNIO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 JULIO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado  
 AGOSTO 2017: Cumple con las metas de acuerdo a lo planificado

Fecha de última actualización: 03/01/2018 ( dd/mm/aaaa )



epoch

**Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

Fecha de entrega: 08 / 08 / 2022

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> <i>Edwin Oswaldo Taco Tenelanda</i>
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<i>Instituto de Posgrado y Educación Continua</i>
<b>Título a optar:</b> <i>Magíster en Gestión del Mantenimiento Industrial</i>
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.



Firmado electrónicamente por:  
**LUIS ALBERTO  
CAMINOS  
VARGAS**



0088-DBRA-UPT-IPEC-2022

