

UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA
“JOSÉ SIMEÓN CAÑAS”

UNIVERSIDAD DON BOSCO



“DESARROLLO DE MODELO DE MANTENIMIENTO
CENTRADO EN LA EFICIENCIA ENERGETICA (EECM)”

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO PARA EL
DECANATO DE POSTGRADO UCA Y
CENTRO DE ESTUDIO DE POSTGRADO UDB

PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRO EN
GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

POR

HERNÁNDEZ GRANDE, ERICK ABILIO
LUNA RODRIGUEZ, RENÉ EDGARDO

ABRIL 2017

ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.

RECTORES

ANDREU OLIVA DE LA ESPERANZA, S.J.

JOSÉ HUMBERTO FLORES MUÑOZ

SECRETARIAS GENERALES

SILVIA ELINOR AZUCENA DE FERNÁNDEZ

YESENIA XIOMARA MARTÍNEZ OVIEDO

DECANA DE POSTGRADO UCA

NELLY ARELY CHÉVEZ REYNOSA

VICERRECTOR DE POSTGRADO

HERBERT BELLOSO

DIRECTORES DE LA MAESTRÍA EN GERENCIA DE
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

LAURA ORELLANA

NELSON QUINTANILLA

DIRECTOR DEL TRABAJO

ISMAEL ANTONIO SÁNCHEZ FIGUEROA

INDICE

RESUMEN	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
SIGLAS	vii
ABREVIATURAS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del trabajo.....	2
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivo General	4
1.4 Metodología de investigación a aplicar y temario a desarrollar.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Normas de eficiencia energética	8
2.2 Herramientas de análisis e indicadores de eficiencia energética.....	11
2.3 Metodología de mantenimiento	14
2.1 Puntos claves para mantener y mejorar la eficiencia energética	18
2.2 Tipos y modelos de mantenimiento.....	19
2.3 Plan de mantenimiento.....	20
3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARALA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PROPUESTO.....	23
3.1 Diagnóstico de situación actual	23
3.2 Análisis de deficiencias detectadas y definición del proceso de solución	24
3.2.1 Análisis estadístico y matemático.....	24

4.	ANALISIS DE RESULTADOS	33
4.1	Modelo de mantenimiento basado en eficiencia para una caldera	33
4.1.1	Mantenimiento de la caldera a analizar	35
4.1.2	Línea base del sistema	36
4.1.3	Modelo de predicción de pérdida de eficiencia	38
4.1.4	Frecuencia de mantenimiento	40
4.1.5	Monitoreo de condición	41
4.1.6	Indicadores	41
4.2	Modelo de mantenimiento basado en eficiencia para un sistema de refrigeración tipo “chiller”	42
4.2.1	Mantenimiento del “chiller” a analizar	44
4.2.2	Línea base del sistema	45
4.2.3	Modelo de predicción de pérdida de eficiencia	50
4.2.4	Frecuencia de mantenimiento	51
4.2.5	Indicadores	53
4.3	Modelo de mantenimiento basado eficiencia para un compresor.	54
4.3.1	Mantenimiento del compresor a analizar	56
4.3.2	Línea base del sistema	57
4.3.3	Modelo de predicción de pérdida de eficiencia	58
4.3.4	Frecuencia de mantenimiento	61
4.3.5	Monitoreo de condición	62
4.3.6	Indicadores recomendados para el modelo	63

4.4	Modelo de mantenimiento para tanques de calentamiento.....	64
4.4.1	Modo de falla	66
4.4.2	Análisis de supervivencia	66
4.4.3	Análisis de costo	68
4.4.4	Tipo de mantenimiento recomendado	69
4.5	Resumen de resultados	70
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
	REFERENCIAS.....	75

RESUMEN

El trabajo de graduación consiste en el desarrollo de un modelo de mantenimiento centrado en la eficiencia energética que complementa otros sistemas como el Mantenimiento Centrado en Fiabilidad, conocido por RCM (Reliability Centred Maintenance) o el Mantenimiento Productivo Total, conocido por las siglas TPM (Total Productive Maintenance) en busca de disminuir el costo energético y mejorar la competitividad de la empresa.

Se seleccionaron 4 sistemas, clave para la operación de la planta que se estudió, los cuales se detallan en sus respectivos capítulos donde se realizaron las mediciones de los parámetros críticos de trabajo con equipos especializados de monitoreo en línea que ayudó a la obtención de los datos a analizar.

Se estructuró un modelo matemático donde se consideran para cada caso específico las variables que afectan la eficiencia del equipo y la manera en que disminuye dicha eficiencia con el paso del tiempo y variación de esos parámetros.

Para este modelo se consideraron los siguientes factores:

1. El retorno de inversión de un suministro/cambio oportuno de repuestos claves, este factor es importante, debido a que es el que demuestra, si aumentar frecuencias de mantenimiento es económicamente sostenible. Y se consideró con una fórmula de valor acumulado.
2. Identificar o desarrollar indicadores que permitan conocer el estado del equipo y observar las tendencias del mismo. Este factor es importante, debido a que en la mayoría de ocasiones se busca establecer un único indicador, que sirva para poder programar mantenimientos, sin tener que llevar contabilizadas las horas de operación del equipo. Además puede aplicarse a gestión del mantenimiento basado en condición.
3. La velocidad de pérdida de eficiencia, este factor es la base de la predicción del retorno de inversión, debido a que puede aumentar o disminuir las frecuencias de mantenimiento.

4. Los costos base de la operación del equipo y el mantenimiento. Junto con la pérdida de eficiencia, estos valores, pueden manipular el retorno de inversión y son los que reflejan en el modelo la situación económica. Por ejemplo los costos de combustibles o costo de energía eléctrica.

Para cada sistema, también se presenta un análisis, en el cual se logra observar el costo por falta de mantenimiento o mantenimiento innecesario, esto con el fin de determinar la frecuencia óptima del mantenimiento en cuanto a los costos.

Finalmente se presentan recomendaciones y herramientas que ayudan a implementar este modelo y comparaciones con respecto a los modelos RCM y TPM, bajo los cuales se les evalúan las ventajas de aplicación, en relación a cómo se reducen los costos, cómo mejoran la productividad y cómo se cierra el círculo de la mejora continua, para cada modelo.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo de mejora continua.	8
Figura 2.2. Comparación de estructura tradicional vs. Estructura enfocada en la gestión energética	12
Figura 2.3 Diagrama de proceso de análisis de modos de falla y efecto	14
Figura 2.4 Ejemplo de diagrama de decisión RCM.....	16
Figura 3.1 Triángulo de costo acumulado de mantenimiento.....	30
Figura 3.2 Triángulo de costo de mantenimiento con descripciones.....	31
Figura 4.1 Grafica de consumo de diésel diario.....	34
Figura 4.2 Presión de línea en psi	34
Figura 4.3 Temperatura de chimenea de caldera	34
Figura 4.4 Gráfica de eficiencias de Oxígeno vrs Temperatura de chimenea	37
Figura 4.5 Valores de eficiencia diaria de caldera	38
Figura 4.6 Curva de regresión lineal para la pérdida de eficiencia en el tiempo	39
Figura 4.7 Comparación de frecuencias de mantenimiento	40
Figura 4.8 Gráfica de consumo de energía diaria	43
Figura 4.9 Gráfica de promedio de toneladas de refrigeración diaria.....	43
Figura 4.10 Gráfica de temperatura ambiente promedio diaria	43
Figura 4.11 Datos de desempeño según temperatura.....	46
Figura 4.12 Gráfica de eficiencia de chiller.	49
Figura 4.13 Curva de regresión ajustada.....	50
Figura 4.14 Comparación de frecuencias de mantenimiento	52
Figura 4.15 Gráfica de consumo eléctrico del compresor.	55
Figura 4.16 Gráfica del flujo volumétrico entregado por el compresor	55
Figura 4.17 Gráfica de la presión diferencial de filtro separador.	55

Figura 4.18 Gráfica de rendimiento del compresor	58
Figura 4.19 Gráfica de pérdida de eficiencia del compresor representada en el rendimiento.	58
Figura 4.20 Curva de regresión ajustada.....	59
Figura 4.21 Gráfica de comparación de frecuencia de mantenimiento	60
Figura 4.22 Comportamiento del diferencial de presión después del mantenimiento.....	62
Figura 4.23 Ciclo de trabajo de las resistencias del tanque	64
Figura 4.24 Controles de temperatura de tanques.....	65
Figura 4.25 Relé de estado sólido	65
Figura 4.26 Diagrama de funcionamiento del sistema de calentamiento	65
Figura 4.27 Gráfica de regresión ajustada para ciclos TOF	67
Figura 4.28 Curva de probabilidad de supervivencia	68
Figura 4.29 Diagrama de conexión para modificación de monitoreo.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Normas de gestión de eficiencia energética.	9
Tabla 2.2 Ejemplo de hoja de decisión	18
Tabla 4.1 Especificaciones de caldera	33
Tabla 4.2 Datos medidos de la caldera	33
Tabla 4.3 Costo de mantenimiento del lado de fuego.....	35
Tabla 4.4 Medición de eficiencia	36
Tabla 4.5 Tabla de eficiencias basadas en temperatura de chimenea	36
Tabla 4.6 Indicadores de control y monitoreo de caldera.....	41
Tabla 4.7 Datos del chiller	42
Tabla 4.8 Datos medidos del chiller.....	42
Tabla 4.9 Costo de mantenimiento de chiller.....	44
Tabla 4.10 Datos antes y después de mantenimiento del chiller	45
Tabla 4.11 Muestras de temperatura ambiente y temperatura de salida del agua.....	45
Tabla 4.12 Interpolación para COP 30°C	47
Tabla 4.13 Interpolación para COP 35°C	47
Tabla 4.14 Interpolación entre COP a 30°C y COP a 35°C	48
Tabla 4.15 Datos para interpolación de COP real	49
Tabla 4.16 Resumen de costo de energía tomado de pliego tarifario	51
Tabla 4.17 Indicadores de control de chiller	53
Tabla 4.18 Datos del compresor.....	54
Tabla 4.19 Mediciones realizadas al compresor.....	54
Tabla 4.20 Detalle del mantenimiento del compresor	56
Tabla 4.21 Datos antes y después de mantenimiento de compresor.....	57
Tabla 4.22 Datos para el cálculo de frecuencia óptima de mantenimiento	61

Tabla 4.23 Valores de las variables resultantes del análisis estadístico	62
Tabla 4.24 Indicadores de control para compresor	63
Tabla 4.25 Datos de los tanques de calentamiento	64
Tabla 4.26 Análisis de modo de falla y efecto.....	66
Tabla 4.27 Valores de variables de distribución de Weibull	67
Tabla 4.28 Tabla de simulación de revisiones para análisis de costo	68
Tabla 4.29 Ejemplo de análisis de costo por simulación de revisiones	69
Tabla 4.30 Resultados de simulación y análisis de costo	69
Tabla 4.31 Detalle de inversión de sistema propuesto.....	69
Tabla 4.32 Tabla comparativa entre modelos de mantenimiento comunes y el modelo centrado en eficiencia	71

SIGLAS

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedad americana de ingenieros en calentamiento, refrigeración y aire acondicionado)

ASME, American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)

CFM, Cubic feet per minute (Pies cúbicos por minuto)

Cm, Costo de mantenimiento.

COP, Coefficient of performance

FMEA, Failure Modes and Effects Analysis (Análisis de modo de falla y efecto)

gph, galones por hora

kW, Kilo watt

kWh, Kilo watt hora

MGI, McKinsey Global Institute (Instituto global McKinsey)

NEMA, National Electrical Manufacturers Association (Asociación nacional de fabricantes eléctricos)

DP, Diferencial de presión

psi, Pounds per square inch. (Libras por pulgada cuadrada)

psig, Pounds per square inch gauge. (Libras por pulgada cuadrada manométricas)

RCA, Root cause analysis (Análisis de causa raíz)

RCM, Reliability Centred Maintenance (Mantenimiento centrado en confiabilidad)

TPM, Total Productive Maintenance (Mantenimiento productivo total)

TR, Toneladas de Refrigeración.

USD, United States dollar (Dolar de Estados Unidos)

USE, Uso Significativo de Energía.

ABREVIATURAS

C, Grados Celsius

e, Eficiencia

E, Energía

F, Grados Fahrenheit

K, Constante

kg, Kilogramo

P, Potencia

r, Rendimiento

T, Temperatura

1. INTRODUCCIÓN

Durante años, las empresas de manufactura, no sólo en El Salvador, sino en el mundo, al realizar mantenimientos a sus equipos; típicamente el grupo de mantenimiento y producción desmontan los equipos para su reparación sin medir el impacto de la eficiencia energética en cada mantenimiento. La razón por la cual hacen esto, está basada en el hecho de que no pueden diagnosticar cuál de los activos necesita mejorar su eficiencia energética para optimizar los procesos de producción. Es aquí donde una estrategia de gestión funciona.

El incremento en eficiencia energética, representa para la industria un aumento significativo en su margen de utilidad, lo que le mejora su flujo de caja; y le posibilita, capitalizar para invertir en otros aspectos de las operaciones y mantenimiento de sus activos.

Una mayor eficiencia energética se traduce inmediatamente en incremento en la capacidad de producción para cumplir con los incrementos en la demanda, mayor confiabilidad y reducción en el coste de mantenimiento, reducción de tiempo extra por imprevistos, reducción en costes de control ambiental y disposición de desperdicios, mayor productividad y los ingresos consecuentes.

El reto de la industria salvadoreña a mediano plazo es la implementación de una estrategia de mantenimiento centrada en la eficiencia energética que proporcione confiabilidad operacional para ir evolucionando junto con las necesidades de la gestión de activos y las tendencias del mercado de pequeñas y grandes compañías. Con esto las empresas percibirán cada vez más la necesidad de obtener el mayor retorno posible de la inversión empleando tecnología para lograr el máximo rendimiento con el mínimo coste de producción y con sostenibilidad (seguridad medioambiental y del personal).

1.1 Descripción del trabajo

La idea central del trabajo de graduación, está orientada a innovar la forma en que se planifican los mantenimientos, tomando como base indicadores que relacionen la eficiencia energética y de recursos, versus los costos del mantenimiento. Esto con el objetivo de optimizar el rendimiento económico de la empresa.

Lo novedoso que ofrece el modelo es que no solamente se propone prevenir fallas o controlarlas con estudios de confiabilidad, sino también considera contrarrestar las pérdidas de eficiencia como objetivos del mantenimiento.

Como medida de efectividad del modelo, se han realizado mediciones de 4 sistemas muy utilizados en la industria, estos son:

- Sistema de aire comprimido.
- Sistema de generación de vapor.
- Sistema de calentamiento de tanques.
- Sistema de refrigeración basado tanto en expansión directa como en agua fría conocido comúnmente como “chiller”.

Para ello se parte de mediciones en la empresa AVX Industries LTD y manuales de fabricantes de equipos. Con los cuales se obtuvieron frecuencias de mantenimiento recomendadas por fabricantes, que aseguran el buen funcionamiento del equipo; y cómo influyen en la eficiencia de los equipos. Finalmente se determinó basándose en el modelo de mantenimiento propuesto, si estos son eficaces y eficientes en mantener los equipos.

Seguidamente, se estableció las buenas prácticas de mantenimiento que optimizan la eficiencia de los equipos, con el objetivo de incorporarse en el modelo y con ello generar indicadores y herramientas propias del modelo para estos 4 sistemas que se utilizaron de ejemplo.

Además de lo anterior, se crearon herramientas que facilitan el seguimiento del sistema para cerrar el ciclo de mejora continua, con evaluaciones frecuentes y realizando actividades que permiten realizar los mantenimientos de forma óptima.

Finalmente, se obtuvo un modelo completo, que al ser implementado generaría una reducción tanto en el consumo energético como el de materias primas debido al mantenimiento e incremento de la eficiencia.

1.2 Hipótesis

Actualmente muchos enfoques de mantenimiento son aplicados para devolver los equipos a sus condiciones funcionales, sin embargo esto no asegura que lo hagan de una forma energéticamente eficiente.

Muchas industrias en el país y a nivel mundial, utilizan el mantenimiento para prevenir el daño de los activos, pero no siempre evalúan su eficiencia energética y el uso de la materia prima como principal indicador de planificación. Es un hecho que el costo completo de los equipos es la suma de los siguientes factores:

- Costo de adquisición.
- Costo de mantenimiento preventivo y correctivo.
- Costo de operación.

Si se analiza el porcentaje en el que cada uno influye a lo largo del ciclo de vida del activo, es normal que los costos de operación en la mayoría de ocasiones supera con creces la suma de adquisición y mantenimiento. Esto significa que mantenerlos eficientes se traduce en ahorros a lo largo del ciclo.

Es por lo anterior, que al crear un modelo que asegure alcanzar puntos de eficiencia económicamente viables después de los mantenimientos donde se reemplacen repuestos críticos, nos ayudará en el mejor desempeño de los equipos, reduciendo pérdidas de tiempo, materiales, energía, entre otros.

Enfoques de mantenimiento tales como RCM (Reliability Centred Maintenance, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad por sus siglas en inglés) utilizan indicadores claves como el tiempo promedio antes de falla o tiempo promedio o de reparación para estimar tiempos operativos, se propone en este caso un modelo que optimice el uso de recursos como combustibles, materias primas y energía eléctrica.

En la investigación inicial que se llevó a cabo, se determinó que actualmente no existe un modelo que cumpla con tener indicadores claves como la eficiencia de la máquina y el retorno de inversión de un mantenimiento como herramienta de planificación. Por consiguiente, este nuevo enfoque que no se ha abordado en el estado de la técnica actual, posee potencial para mejorar el rendimiento económico en la industria.

Lo que se pretende solucionar y responder con esta propuesta, son los siguientes problemas:

- Es posible crear un modelo de mantenimiento que combine los beneficios de mantener equipos con alta eficiencia y prevenir fallas, siendo este económicamente viable.
- ¿Qué herramientas son efectivas para analizar mantenimientos oportunos que tengan un buen retorno de inversión?
- ¿Cuáles indicadores serán necesarios para evaluar el buen desempeño de la implementación del modelo?

1.3 Objetivo General

- Desarrollar un modelo de mantenimiento centrado en índices de eficiencia que optimice los recursos del proceso con especial énfasis en los energéticos, utilizando como herramientas, análisis de retorno de inversión para mejorar el rendimiento económico.

1.4 Metodología de investigación a aplicar y temario a desarrollar

Para desarrollar el modelo de mantenimiento basado en eficiencia, se hizo una investigación previa del estado de la técnica, para verificar los últimos avances en las herramientas de estudio de eficiencia de equipos y métodos de predicción.

Seguidamente, se investigaron los modelos actuales de mantenimiento y sus tendencias, para establecer las claras diferencias del modelo propuesto.

Se desarrollaron nuevas herramientas y se adaptaron herramientas para crear matrices de decisión y, de esta manera ayudar al modelo a crear un conjunto de pasos que lleven a la implementación.

El documento tiene los siguientes resultados de la investigación y desarrollo:

1. Marco teórico, que es un resumen de toda la investigación.
2. Investigación sobre el estado actual de la técnica y la propuesta del modelo.
3. Modelo de mantenimiento centrado en eficiencia, que contendrá los pasos para la aplicación y mejora continua.
4. Herramientas para la implementación del modelo.
5. Indicadores para el modelo de mantenimiento centrado en eficiencia.
6. Comparativa del modelo contra otros modelos de mantenimiento.

Además de lo anterior, se incluye portada, objetivos, conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

2. MARCO TEÓRICO

Los costes de la energía continúan incrementándose en todo el mundo, por lo que bajo estas condiciones es muy importante mejorar la eficiencia de su uso a través de estrategias de confiabilidad integral de activos.

La eficiencia energética con que operan los equipos, se puede definir como las acciones que se planifican para lograr que estos alcancen su mayor rendimiento con el menor consumo de energía, asegurando el abastecimiento y fomentando un comportamiento sostenible en su uso y por tanto la protección del medio ambiente.

Lo más interesante de las iniciativas de eficiencia energética es que, además de existir un gran potencial de impactos positivos en el medio ambiente, muchas son rentables, ya que el ahorro que se deriva del menor consumo de energía es superior a los costos de las inversiones. La Comisión Europea, por ejemplo, presenta en su Libro Verde sobre eficiencia energética, que se puede ahorrar un 20% del consumo energético de toda la Unión Europea de forma rentable. Sólo por constituirse como una acción vital para la lucha contra el cambio climático de forma rentable merecería la pena dedicar el máximo esfuerzo a mejorar la eficiencia energética de nuestra sociedad, pero es que, además, el ser más eficiente se constituye como una fuente de generación de riqueza y empleo.

El McKinsey Global Institute (MGI), en su informe "Capturing European Energy Productivity Opportunity" de septiembre de 2008, identifica siete áreas con importantes oportunidades de negocio asociadas a la mejora de la eficiencia energética: elementos constructivos, aparatos eléctricos, transporte, gestión de demanda, soluciones energéticas particularizadas por tipo de cliente, servicios energéticos y financiación de inversiones. Junto a estas oportunidades de negocio, también la eficiencia energética se presenta como un elemento de competitividad para las empresas existentes, y más en un contexto de crecientes precios energéticos. En nuestro caso nos referiremos a la gestión integral del mantenimiento de activos.

2.1 Normas de eficiencia energética

El desarrollo del mantenimiento enfocado en la eficiencia energética es una nueva filosofía que ha surgido producto del aumento del precio de la energía en la industria y la necesidad de reducir la contaminación ambiental por la vía de su menor consumo. Sin embargo, en la actualidad no existe una metodología y mucho menos un manual que permita al personal técnico de las diversas empresas aprovechar esta nueva práctica.

La mayor dificultad que se tiene es que se requieren conocimientos acerca de las áreas de mantenimiento, eficiencia energética y gestión, que adecuadamente combinados y desarrollados producen la nueva filosofía de gestión del mantenimiento enfocado en la eficiencia energética.

En el año 2008 la ISO conformó un Project Committee (PC) con el único fin de desarrollar una norma de sistemas de gestión sobre Gestión Energética, la ISO 50001. Esta Norma Internacional es aplicable a organizaciones de todo tipo y tamaño, independientemente de sus condiciones geográficas, culturales o sociales.

La implementación exitosa depende del compromiso de todos los niveles y funciones de la organización y, especialmente, de la alta dirección. Esta Norma Internacional se basa en el ciclo de mejora continua Planificar – Hacer – Verificar – Actuar (PHVA) e incorpora la gestión de la energía a las prácticas habituales de la organización tal como se muestra en la figura 2.1.

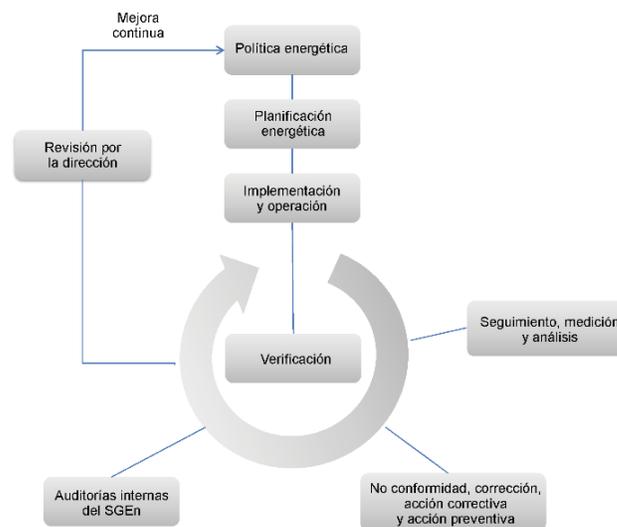


Figura 2.1. Ciclo de mejora continua.

En la tabla 2.1 se presenta un cuadro resumen de normas vigentes de eficiencia energética y aplicaciones de las mismas.

NORMA	SE APLICA A
ISO 50001	Industrias y busca mejorar la gestión energética incorporándole en las políticas de las empresas.
Energy Star	Equipos y busca asegurar un estándar de eficiencia en equipos según el consumo.
ASHRAE 90.1	Edificios comerciales y edificios residenciales, aporta claves en la construcción y diseño de edificios.
ASHRAE 100	Eficiencia energética en edificios ya construidos, busca mejorar la eficiencia en edificaciones.
ASHRAE Procedimientos para auditorías energéticas en edificios comerciales	Da las pautas y procedimientos para auditorías energéticas de nivel 1, 2 y 3.

Tabla 2.1. Normas de gestión de eficiencia energética.

Además de estas, existen otras normas como las NEMA, en equipos eléctricos que contempla el etiquetado de equipos de alta eficiencia y regulan las clases de los equipos basados en eficiencia, como los motores Premium que actualmente son los motores con mayor eficiencia en el mercado común.

Como se puede observar en la Tabla 2.1, existen varias normas que buscan aplicar la eficiencia energética a diferentes niveles.

La ISO 50001, es la que engloba a mayor nivel la gestión de eficiencia energética, sin embargo por el hecho de ser norma deja muy abierta su aplicación. Es por ello que esta se puede complementar con muchas otras normas y herramientas que dependen de las empresas e industrias adoptarlas.

Por lo anterior, se puede ver que ninguna de ellas está explícitamente orientada al mantenimiento, a pesar que el mantenimiento es uno de los grandes contribuyentes en el buen funcionamiento de los equipos y la eficiencia energética.

Un concepto importante en esta norma internacional es el Uso Significativo de la Energía (USE), que se refiere al uso de la energía que ocasiona un consumo substancial de energía y/o que ofrece un potencial considerable para la mejora del desempeño energético, el cual es determinado según el criterio de significación por la organización.

Los parámetros de control de mantenimiento que impactan el desempeño energético de los equipos o procesos que son Usuarios Significativos de Energía (USE), no han sido tratados a profundidad en las organizaciones nacionales, ya que el mantenimiento hasta hoy está dirigido principalmente a mantener la disponibilidad y confiabilidad de los equipos y no la eficiencia.

Esto provoca que un equipo puede pasar de un consumo estándar de energía a un alto consumo de energía, por problemas de deterioro del estado técnico como, desajustes mecánicos, desbalanceo, desajuste del sistema de control operacional, ensuciamiento de filtros o superficies de transferencia de calor etc. y mientras que esto no afecte la producción o disponibilidad del equipo, el mismo no se interviene.

Lo anterior es provocado por dos limitaciones de la gestión de mantenimiento. La primera, que no se mide la eficiencia energética del equipo o proceso en operación y por tanto no se conocen sus cambios y las causas de estos en tiempo real. La segunda, que no existen criterios y/o actividades de mantenimiento para mantener el desempeño energético del equipo o proceso en los niveles adecuados o estándares.

2.2 Herramientas de análisis e indicadores de eficiencia energética

Un punto importante para los sistemas de eficiencia energética, es la implementación de herramientas que faciliten la priorización, predicción e interpretación de datos para toma de decisiones.

Muchos ejemplos pueden encontrarse en el documento “A Tool to Prioritize Energy Efficiency Investments” de los laboratorios de energía renovable de Estados Unidos.

Otras herramientas como:

- Pareto, para la priorización de esfuerzos.
- Histogramas, para ver frecuencias de datos de consumos de equipos o sistemas.
- Curva monótona, para determinar la cantidad de tiempo en que permanece un equipo operando en diferentes puntos.
- Cartas de control, para determinación y monitoreo de parámetros normales de operación.
- Análisis de consumos con equipos de log de energía.

Entre otras herramientas estadísticas, pero lo más importante en los estudios de eficiencia energética, son los cálculos de ingeniería, los cuales buscan mejorar y reutilizar energía de desperdicio o llevar a puntos de mayor eficiencia los sistemas.

Ahora bien, una estrategia centrada en la eficiencia energética requiere revisar los escenarios, conocer nuestras debilidades y fortalezas, observar nuestras oportunidades y amenazas, tener metas claras, alcanzables y posibles y contar con las herramientas de Confiabilidad (RCM, RCA, Six Sigma, TPM, Lean Manufacturing, etc.) adecuadas. Plantearnos objetivos que nos conduzcan a alcanzar las metas, requiere del conocimiento de todos los involucrados, pero más allá del conocimiento de saber exactamente qué queremos y donde queremos estar.

En la actualidad uno de los grandes retos que están afrontando las organizaciones, independientemente del tamaño, es la reducción en el coste del mantenimiento mediante la aplicación de técnicas y herramientas de gestión.

Las industrias están en una encrucijada, los empleados están bajo presión para aumentar la rentabilidad de las inversiones y a la vez mejorar la productividad de las organizaciones. Muchas empresas están revisando sus organizaciones y procesos, lo que muchas veces implica acabar con estructuras tradicionales en busca de mayor productividad y definitivamente la reducción de los costes por mantenimiento, mirando el presente -futuro o el pasado, en la figura 2.2 se presenta un esquema de ambos tipos de gestiones.

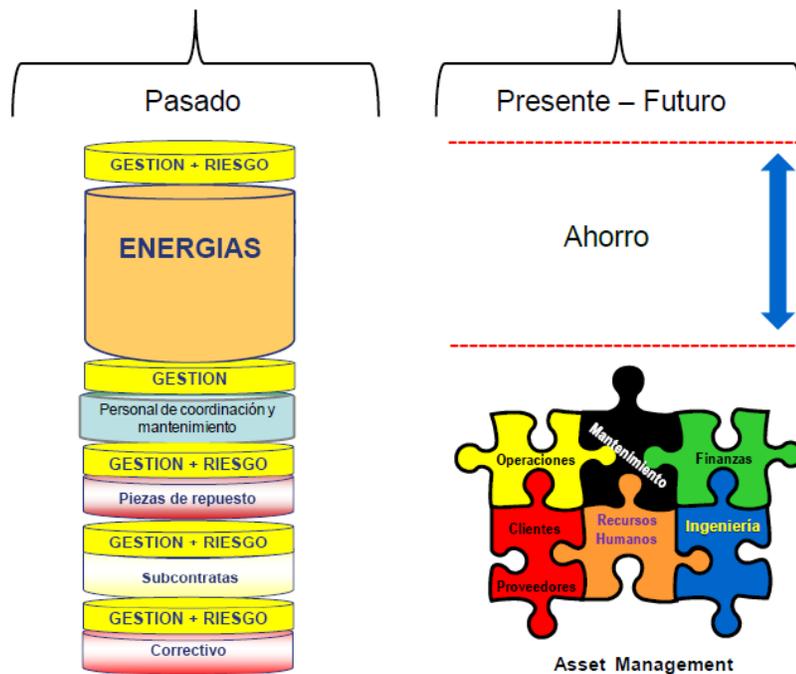


Figura 2.2. Comparación de estructura tradicional vs. Estructura enfocada en la gestión energética

La mejor forma de control del rendimiento energético en sistemas o equipos, es con el uso de Indicadores. Pero, para que estos en realidad se puedan utilizar, estos se deben estandarizar, basado en lo que se quiere medir y cómo se va a medir. Además debe determinarse la frecuencia, de lo contrario los resultados en la mejora y monitoreo del sistema no serán buenos.

Para diferentes sistemas se utilizan indicadores específicos, a continuación se colocan algunos ejemplos por sistemas:

- Sistemas de vapor:
 - Vapor generado/ Consumo de combustible.
 - Vapor generado/ Volumen de producción.
 - Eficiencia de combustión.
 - Porcentaje de recuperación de condensado.

- Aire comprimido:
 - Energía eléctrica consumida/ volumen de aire comprimido generado.
 - Volumen de aire generado/ volumen de producción.
 - Porcentaje de pérdida de aire.
 - Eficiencia de compresor.

- Rendimiento eléctrico:
 - Energía consumida/ volumen de producción.
 - Factor de potencia.
 - Eficiencia de transformadores y equipos electromecánicos.

- Sistemas térmicos y de refrigeración:
 - Volumen de agua consumida en Sistema de Refrigeración / Energía Entregada al Sistema.
 - Energía eléctrica consumida en Sistema de Refrigeración / Volumen de producción.
 - Energía Entregada al Sistema / Energía eléctrica consumida en sistema de refrigeración.
 - Eficiencia de compresores.

2.3 Metodología de mantenimiento

Existen algunas metodologías para la gestión del mantenimiento como por ejemplo la metodología propuesta por el Mantenimiento Centrado en Fiabilidad, conocido por RCM (Reliability Centred Maintenance) la cual parte de un análisis tipo FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), desarrollado en un formato denominado “Hoja de Información RCM” como se muestra en la figura 2.3, y donde se describe para cada equipo la siguiente información:

- Función.
- Falla Funcional.
- Modo de Falla.
- Efecto de la Falla.



Figura 2.3 Diagrama de proceso de análisis de modos de falla y efecto

Las fallas funcionales se definen como la incapacidad de un sistema para satisfacer un estándar de funcionamiento deseado,

Los modos de falla son los eventos que pueden causar una pérdida de función o una falla funcional. Los modos de falla deben ser determinados bajo los siguientes factores:

- Deben ser razonablemente probables de ocurrir.
- Deben incluirse los modos de falla que han ocurrido previamente, los que son prevenidos con el plan de mantenimiento actual y los que no han ocurrido pero son razonablemente probables de ocurrir.
- Se debe incluir los modos de falla relacionados con el desgaste, defectos de diseño y errores humanos durante la operación y mantenimiento.

Los efectos de las fallas, indican lo que pasaría si ocurriera cada modo de falla. Se debe considerar los siguientes factores cuando se describen los efectos de las fallas:

- Se debe describir el efecto de un modo de falla como si ninguna tarea específica se estuviera haciendo para anticiparse o prevenir la falla.
- Se debe incluir la evidencia de que el modo de falla se haya presentado.
- Se debe describir como podría el modo de falla poner en riesgo la seguridad de las personas y la integridad del medio ambiente.
- Se debe describir como podría el modo de falla tener un efecto adverso sobre la operación.
- Se debe indicar los pasos para restaurar la función del sistema luego que se dé la falla funcional.

A partir de la Hoja de Información, se utiliza el “Diagrama de Decisión RCM” (Moubray, 1997) que se muestra en la figura 2.4, a través de una secuencia lógica de análisis, se obtiene el listado de las tareas de mantenimiento a desarrollar.

Para la Falla de la Función establecida en la Hoja de Información, se recorre el Diagrama de Decisión, desde la parte superior izquierda hacia la parte derecha y hacia abajo respondiendo a las preguntas planteadas en dicho diagrama.

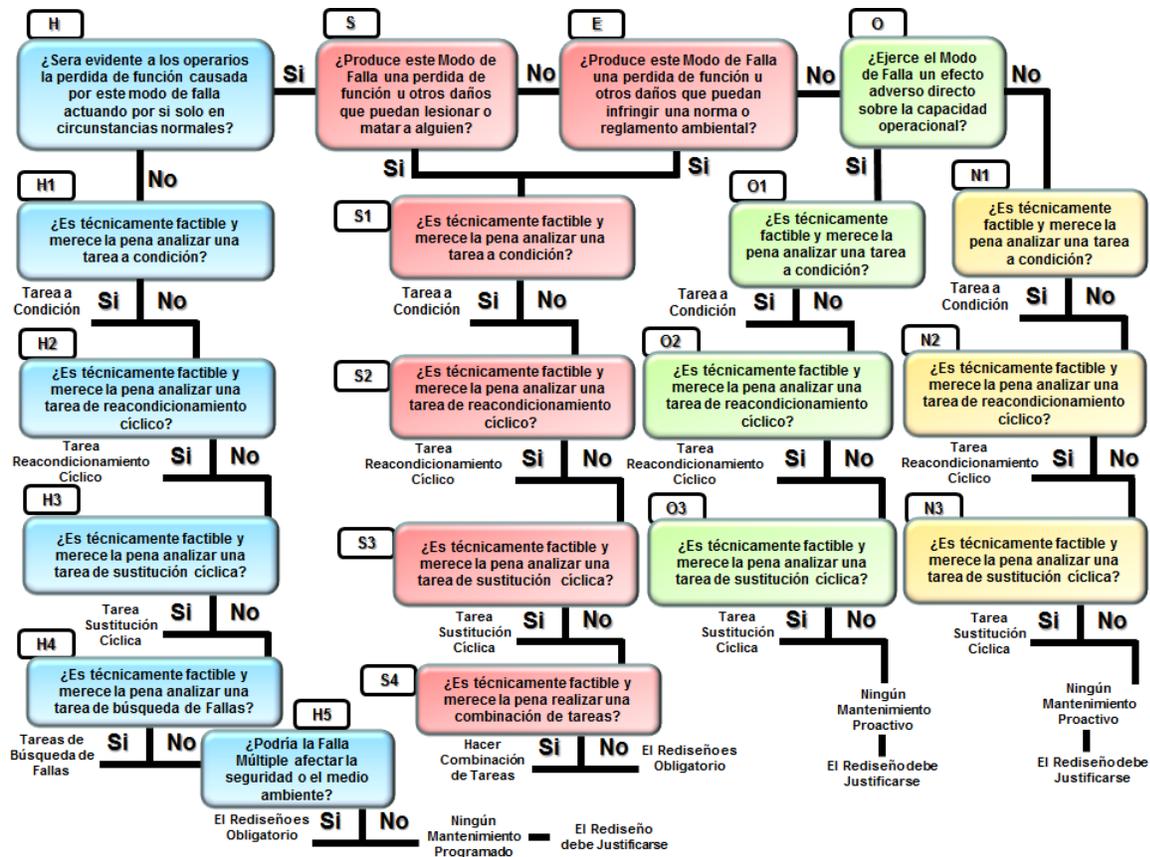


Figura 2.4 Ejemplo de diagrama de decisión RCM

1. Para la primera pregunta si ¿es evidente a los operarios?, lo que se busca son consecuencias de fallas ocultas. Este tipo de consecuencias no tienen un impacto directo, pero exponen a la organización a fallas múltiples con consecuencias serias y catastróficas. La mayoría se encuentra asociada a sistemas de protección.
2. Las consecuencias ambientales y para la seguridad. Este tipo de consecuencias son producidas por modos de falla que posiblemente causen daño o muerte a alguna persona. Así mismo, este tipo de consecuencia se relaciona con modos de falla que infringen alguna normativa o reglamento ambiental.
3. Consecuencias operacionales. Este tipo de consecuencias tienen una afectación con la producción, calidad del producto, atención al cliente o costos operacionales.
4. Costos no operacionales. Involucra a todos los modos de falla que en caso de que suceda, solo se relaciona con el costo de reparación de la misma.

Luego se procede a determinar la estrategia de mantenimiento con la definición de las siguientes preguntas del diagrama de decisión (figura 2.4).

1. Tarea a condición. Este tipo de tarea se define en el monitoreo de condiciones físicas identificables que indican que una falla está por ocurrir o están en proceso de ocurrir.
2. Tarea de reacondicionamiento cíclico. Este tipo de tarea consiste en fabricar un componente o reparar un conjunto antes de un límite de tiempo específico sin importar su condición en ese momento.
3. Tarea de sustitución cíclica. Este tipo de tarea implica sustituir un componente antes de un límite de tiempo específico, más allá de su condición en ese momento.
4. Tarea de búsqueda de fallas. Este tipo de tarea implica la revisión periódica de funciones ocultas para determinar si han fallado.
5. Rediseño. Este tipo de tarea implica hacer cambios de una sola vez a las capacidades iniciales de un sistema. Esto incluye cambios en la instalación y de procedimientos.
6. Ningún mantenimiento programado. Este tipo de tarea implica dejar que ocurra el modo de falla para luego realizar un mantenimiento correctivo.

Como resultado de este análisis que se hace utilizando la figura 2.4, se elabora la “Hoja de Decisión” como se muestra el ejemplo en la tabla 2.2, en la cual para cada modo de falla se define la actividad de mantenimiento correspondiente. Las actividades o tareas de mantenimiento según RCM pueden ser de dos tipos:

1. Tareas Proactivas (preventivas), que corresponden a una estrategia de prevención de fallas:
 - Sustitución y Reacondicionamiento Cíclico (Time Based Maintenance).
 - Condicionales o Predictivas (Conditional Based Maintenance).
2. Acciones a falta de una tarea proactiva efectiva, que corresponden a una estrategia de acción contra la falla:
 - Búsqueda de fallas ocultas.
 - Rediseño.
 - Mantenimiento a rotura o avería.

RCM – HOJA DE DECISIÓN								SISTEMA: LÍNEA DE TRANSMISIÓN						Facilitador:		Fecha	
								SUBSISTEMAS: CABLE DE GUARDA						Auditor:		Hoja 12 de 32	
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias					H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acciones a falta de			Tarea propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por	
F	FF	FM	H	S	E	O				H4	H5	S4					
11	A	1	N					N	N	N	S			Chequear condiciones tales como los aisladores quemados, flameo, herrajes fundidos, cable de guarda distensionado o faltante, corrimiento de herrajes de sujeción. La detección de uno de estos tipos de anomalías debe ser reportada para ejecutar el reacondicionamiento o sustitución del cable de guarda.	Semestral	Técnico	
11	A	2	S	N	N	S	S							Inspeccionar y verificar que exista la unión entre el cable de guarda y el camino de puesta a tierra. Una vez detectada la anomalía, ésta se debe reportar para ejecutar la acción correctiva.	Anual	Técnico	
19	A	1	S	S			S							Revisar continuidad del templete, desde la varilla de cimentación hasta los anillos de sujeción al poste. En caso de encontrar defectos, se debe reportar la sustitución inmediata del mismo.	Semestral	Técnico	
19	A	2	S	S			S							Inspeccionar el estado de la tensión mecánica del templete, verificando que esté realizando el esfuerzo para mantener la estructura vertical. En caso de anomalía, reportar para efectuar el retensionado del templete.	Semestral	Técnico	

Tabla 2.2 Ejemplo de hoja de decisión

Finalmente se establece el “Plan de Mantenimiento”, resultante de la aplicación del método, en un formato lo más simple posible, donde se especifica el listado de tareas de mantenimiento, su frecuencia de implementación y la fecha estimada de ejecución. Este plan se añade al Programa de mantenimiento del equipo o proceso seleccionado como uso significativo de energía donde se aplicó el método.

2.1 Puntos claves para mantener y mejorar la eficiencia energética

Existen muchas formas para mejorar y mantener la eficiencia energética de sistemas y equipos, de manera general se pueden enlistar de la siguiente forma:

1. Cambio de equipos como compresores, calderas, aires acondicionados, etc.
2. Mantenimientos de equipos y sistemas, limpiezas en intercambiadores, calderas, cambio de piezas móviles desgastadas.
3. Reutilizar energía de rechazo, como aire caliente, vapor o condensado de sistemas.
4. Cambiar de fuentes de energía.

Muchos avances se han realizado en los puntos de análisis de tecnologías nuevas como motores, unidades compresoras más eficientes o incluso calderas con mejores eficiencias. Sin embargo cambiar de tecnologías es un paso que puede significar un gran costo inicial, pero el resto de pasos pueden significar ahorros sin tener que invertir grandes cantidades iniciales.

Analizar puntos de pérdida de eficiencia o diseñar sistemas de reutilización de energía puede dar grandes retornos de inversión, si estos son técnicamente factibles y utilizables.

La mayor parte de las industrias poseen el mantenimiento como un proceso de funcionamiento, que por lo general busca mantener los equipos funcionando, esto no significa energéticamente eficientes, pero si funcionales. Es por ello, que este es un punto en que todas las industrias pueden mejorar, si, poseen las herramientas adecuadas.

2.2 Tipos y modelos de mantenimiento

El mantenimiento dependiendo desde la óptica que se evalúe, puede diversificarse en modelos concretos y tipos de mantenimiento, esto puede hacerse por el momento en que se realiza el mantenimiento, por lo que se tiene como objetivo lograr, etc...

Como principales tipos de mantenimiento se tienen:

- **Mantenimiento correctivo:** Es el conjunto de operaciones de mantenimiento que buscan corregir una falla, que por lo general es comunicado por el mismo operador del equipo.
- **Mantenimiento preventivo:** Este busca evitar que se dé una falla y mantener el equipo a un cierto nivel de servicio. Para esto, se buscan programar intervenciones al equipo previo a fallas por lo general basados, en tiempos resultados de estudios de históricos de fallas o también pueden realizarse con base al monitoreo de condición.
- **Mantenimiento predictivo:** El mantenimiento predictivo busca por medio del monitoreo de constantes físicas de los equipos y sistemas, de tal manera que se trate de obtener un estimado del tiempo en que fallara, para poder planificar una intervención en el equipo.

Además de lo anterior, existen modelos y metodologías de mantenimiento, que poseen enfoques específicos y pueden ser aplicados para diseños de planes de mantenimiento, los principales exponentes son:

- Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM por sus siglas en inglés), que posee una serie de funciones, para sistemas donde los fallos no son tolerables, donde se buscan minimizar la cantidad de fallos a cero, debido a que estos pueden ser desastrosos.
- Mantenimiento productivo total (TPM, por sus siglas en inglés), que a diferencia de otros modelos de mantenimiento, este propone 3 tipos de mantenimiento, el autónomo, el profesional y el de calidad que se basa en inspecciones. Busca principalmente eliminar fallos y mantener la calidad.

2.3 Plan de mantenimiento

El Plan de mantenimiento centrado en la Eficiencia no se aplica a todos los activos de la organización, sino sólo a aquellos que son Usuarios Significativos de la Energía. Los USE son aquellos equipos o sistemas que impactan significativamente el consumo de energía de la organización.

Una forma de identificar los USE puede ser realizando un diagrama de Pareto estimado de consumo de energía por áreas y por equipos.

Un USE es aquella área, proceso o equipo que ocasiona un consumo sustancial de energía y/o que ofrece un potencial considerable para la mejora del desempeño energético. Una vez identificados los USE y las actividades de mantenimiento, se cierra con el Seguimiento, medición y análisis del desempeño del Plan de mantenimiento.

El objeto de esta actividad es:

- Registrar la tendencia del desempeño energético del USE.
- Analizar desviaciones significativas de las tendencias del buen desempeño energético, cuando ocurren, cuáles son sus posibles causas, verificar las mismas, actuar sobre las causas controlables y verificar la corrección de la tendencia hacia el buen desempeño energético.

- Cuantificar los ahorros que produce la aplicación del Plan de mantenimiento.
- Cuantificar los ahorros que produce la implementación de mejoras a través de inversiones.

El Procedimiento del seguimiento y medición es el siguiente:

- Se establece para cada USE una línea de base del consumo energético.
- Se establece el gráfico de tendencia del indicador de desempeño energético que es la descripción gráfica de la suma acumulativa de las desviaciones del consumo energético real con respecto a la línea de base.
- Se actualiza el gráfico de tendencia con periodicidad, horaria, por turno o diaria.
- Se correlacionan las fechas de los cambios en la tendencia del gráfico con las fechas de las actividades de la gestión del mantenimiento realizada o dejada de realizar.
- Se actúa sobre las actividades que no se han realizado de acuerdo al plan y que han provocado incrementos del consumo, o se realizan análisis para la identificación de nuevas causas de incremento de consumo asociadas al mantenimiento.
- Se aplican acciones correctivas o preventivas, según el caso, para evitar nuevas desviaciones.

Para los procedimientos de medición y seguimiento, se estudiarán los sistemas desde 2 enfoques:

1. El enfoque teórico, que son las especificaciones del fabricante, que estipulen los controles operativos y los parámetros, con los cuales el propone medir su eficiencia.
2. El enfoque de campo, que se basa en los parámetros reales de operación y la medición de eficiencia por medios directos o indirectos.

En el caso de que el fabricante no proporcione los datos de eficiencia o no se encuentren disponibles, lo más recomendable es dar mantenimiento completo al equipo y tomar la eficiencia máxima sostenida durante un tiempo como línea base.

3. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Existen múltiples tendencias para establecer los sistemas de mantenimiento y generalmente se seleccionan atendiendo a la política de la empresa y los requerimientos de calidad, seguridad y mercado, además de las características del proceso productivo. En principio un sistema de mantenimiento bien diseñado debe adecuarse a las características de cada máquina lográndose un sistema de mantenimiento dinámico, tanto a nivel de fábrica como a nivel de máquina.

En este sentido se ha desarrollado una metodología empleando criterios de selección generalmente a nivel de máquina, donde se siguen los siguientes pasos:

- Diagnóstico de situación actual.
- Análisis de deficiencias detectadas y definición del proceso de solución.
- Identificación de frecuencias de mantenimiento y ahorros potenciales.

3.1 Diagnóstico de situación actual

Se estableció para cada equipo a estudiar la caracterización energética y los datos del fabricante. Además se define la situación actual para cada equipo, que incluye los puntos siguientes:

- Se identificó la forma de cómo se lleva a cabo el mantenimiento.
- Se identificó las personas responsables de la labor de mantenimiento.
- Se extrajo datos e información de registros de mantenimiento de cada equipo.
- Se diagnosticó el funcionamiento del equipo.
- Se definieron los parámetros de trabajo del sistema, tales como temperatura, presiones, consumo de energía, etc...
- Se realizaron mediciones de los parámetros críticos que afectan la eficiencia energética.

3.2 Análisis de deficiencias detectadas y definición del proceso de solución

En esta etapa se realizó un análisis estadístico y matemático para generar un modelo que se puede aplicar a la gran mayoría de equipos industriales con los cuales cuentan las plantas de producción. Existen casos especiales en los cuales los análisis se abordan desde otra perspectiva. En el documento se presenta uno de esos casos particulares.

Las actividades que se realizaron fueron las siguientes:

- Se identificaron las ecuaciones para determinar la eficiencia del sistema en su conjunto y de cada elemento del sistema.
- Se evaluó el impacto en los costos operacionales en la variación de la eficiencia.
- Se aplicó un método para evaluar la variación de la eficiencia en el tiempo.
- Se identificaron las rutinas de mantenimiento a aplicar para recuperar la eficiencia.
- Se determinó los costos de las rutinas de mantenimiento para recuperar eficiencia.
- Se definió un “check list” de control de eficiencia para el operador y de cálculo de eficiencia en el tiempo.
- Se formularon indicadores de monitoreo.

3.2.1 Análisis estadístico y matemático.

En este apartado se realizan las deducciones, ecuaciones y fórmulas estadísticas y matemáticas que ayudaron para el análisis de cada uno de los sistemas. Se realizan de manera general a fin de generar el modelo de mantenimiento basado en la eficiencia energética. A lo largo del documento se hará referencia a varias de las ecuaciones que se presentan.

- Línea base de análisis

Se parte de la observación que la pérdida de eficiencia, posee un comportamiento lineal a lo largo del paso del tiempo y que existe variación de los parámetros críticos de operación de cada equipo. Se toma una medición antes y después de mantenimiento para tener un punto de partida.

Utilizando la ecuación punto pendiente, se puede escribir una ecuación que representa la pérdida de eficiencia.

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

m = es la pendiente de la relación entre la variable dependiente con la independiente

y = es la variable dependiente, la cual en la mayoría de los casos será la eficiencia.

x = es la variable independiente, la cual puede ser tiempo, temperatura, etc

Luego, se toma la pendiente y se evalúa en un punto conocido, para obtener el intercepto de la ecuación lineal.

$$b = y(x) - m \cdot x \quad (\text{Ec. 2})$$

b = es el intercepto de la ecuación lineal

Ahora se conoce completamente la ecuación lineal que relaciona temperatura y eficiencia, la cual es propia de cada equipo.

$$y(x) = m \cdot x + b \quad (\text{Ec. 3})$$

Utilizando la ecuación 3 podemos conocer, la eficiencia del equipo para cualquier momento, conociendo los valores de los parámetros críticos.

Posteriormente, se construye la serie de datos de eficiencia diaria para cada uno de los equipos, los cuales se estudiarán en su respectivo análisis.

- Modelo de predicción de pérdida de eficiencia

Con la serie de datos seleccionada, se realiza una regresión lineal para conocer la razón de pérdida de eficiencia en el tiempo estimada para futuros eventos.

Una vez obtenida la regresión lineal. Se puede iniciar a construir un modelo de predicción de pérdida económica basado en la variación del parámetro crítico o el tiempo, que servirá como principal indicador del modelo.

Para la construcción del modelo se requieren los siguientes datos:

$n = \text{Días (Variable independiente)}$

$E = \text{Consumo diario promedio de energía o combustible (Constante)}$

$m = \text{Pendiente de pérdida de eficiencia según la regresión (Constante)}$

$e_m = \text{Eficiencia máxima después del mantenimiento (Constante)}$

$P = \text{Precio promedio de la energía o combustible en USD (Constante)}$

$e(n) = \text{Eficiencia en un día } n \text{ (Ecuación)}$

$C(n) = \text{Costo diario debido a la ineficiencia (Ecuación)}$

$C_a(n) = \text{Costo acumulado debido a la ineficiencia (Ecuación)}$

$K_c = \text{Constante del costo}$

Las ecuaciones y fórmulas para la construcción del modelo para la línea de pérdida de eficiencia, basado en la regresión lineal del modelo son:

$$e(n) = e_m + m \cdot n \quad (\text{Ec. 4})$$

La eficiencia en un día “n” será la eficiencia máxima (justo después del mantenimiento), más la pendiente multiplicada por el número de días, según la ecuación 3.

$$C(n) = (e_m - e(n)) \cdot P \cdot E \quad (\text{Ec. 5})$$

El costo diario por ineficiencia se calcula restando la eficiencia máxima menos la eficiencia en un día “n”, lo cual nos dará la pérdida de eficiencia. El resultado se multiplica por el precio promedio de la energía o combustible y se multiplica también por el consumo diario promedio.

En caso que el consumo sea de energía eléctrica se debe evaluar el pliego tarifario vigente en las fechas y horarios establecidos. Para nuestro caso se analiza de la siguiente manera:

$E_p =$ Consumo promedio de energía punta

$P_p =$ Precio de energía punta

$E_r =$ Consumo promedio de energía resto

$P_r =$ Precio de energía resto

$E_v =$ Consumo promedio de energía valle

$P_v =$ Precio de energía valle

Horarios:

Punta: 18:00 – 22:59 5h

Valle: 23:00 – 04:59 6h

Resto: 05:00 – 17:59 13h

Por lo tanto retomando la ecuación 5 para el caso de energía eléctrica tenemos:

$$C(n) = (e_m - e(n)) \cdot (P_p \cdot E_p + P_r \cdot E_r + P_v \cdot E_v) \quad (\text{Ec. 6})$$

De igual manera si existen variaciones en el pliego tarifario a lo largo del período de análisis de los equipos, se deben tomar en consideración dichas variaciones al momento de realizar la aplicación del modelo propuesto.

Para calcular el costo acumulado de todos los días en los cuales se ha ido perdiendo eficiencia se realiza la sumatoria desde el día 0 hasta el día “n” de todos los costos diarios.

$$C_a(n) = \sum_{i=0}^n C(i) \quad (\text{Ec. 7})$$

Debido a que no se trabaja con valores discretos, se pasa la sumatoria del costo acumulado a forma integral para trabajar los datos de una mejor manera con valores continuos.

$$C_a(n) = \sum_{i=0}^n C(i) = \int_0^n [C(i) + \gamma] di \quad (\text{Ec. 8})$$

$\gamma = \text{Error por conversion de sumatoria a integral}$

Sustituyendo la ecuación del costo diario (Ec. 5).

$$C_a(n) = \int_0^n [(e_m - e(i)) \cdot P \cdot E + \gamma] di \quad (\text{Ec. 9})$$

Sustituyendo la ecuación de la eficiencia (Ec. 4)

$$C_a(n) = \int_0^n [(e_m - (e_m + m \cdot i)) \cdot P \cdot E + \gamma] di = \int_0^n [(-m \cdot i) \cdot P \cdot E + \gamma] di \quad (\text{Ec. 10})$$

Realizando la integral de la ecuación 10.

$$C_a(n) = \int_0^n [(-m \cdot i) \cdot P \cdot E + \gamma] di = \gamma \cdot n - m \cdot P \cdot E \cdot \frac{n^2}{2} \quad (\text{Ec. 11})$$

De la ecuación anterior, se pueden obtener 2 reglas generales:

1. Para sistemas donde la pérdida de eficiencia en el tiempo es lineal y manteniendo constantes el consumo promedio y el precio por unidad de energía consumida, podemos obtener una constante y una ecuación característica para todos los sistemas que cumplan los requisitos previamente mencionados.

$$K_c = -m \cdot P \cdot E \quad (\text{Ec. 12})$$

2. Todos los valores para encontrar el resultado de la constante del costo (Ec. 12), se deberán tomar de los promedios de los datos del sistema a evaluar y la pendiente se encontrará aplicando una regresión lineal del promedio de datos de la pérdida de eficiencia. De no tener suficientes datos para realizar una regresión lineal, se puede utilizar la ecuación punto pendiente en los valores de 2 mediciones al equipo, preferiblemente justo después del mantenimiento y lo más cerca posible del mantenimiento siguiente.

Continuando con el modelo, el valor de la constante γ se encuentra igualando la ecuación del costo acumulado en forma de sumatoria (Ec. 7) con la ecuación del costo acumulado ya integrado (Ec. 11) se despeja γ .

A continuación se muestra la ecuación (Ec. 13.) con γ despejada, donde n es cualquier valor mayor a cero.

$$\gamma = \frac{\sum_{i=0}^n C(i) + m.P.E. \cdot \frac{n^2}{2}}{n} = \frac{\sum_{i=0}^n [-m.P.E. \cdot i] + m.P.E. \frac{n^2}{2}}{n}$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=0}^n [K_c \cdot i] - K_c \frac{n^2}{2}}{n} = \frac{K_c}{n} \left(\sum_{i=0}^n [i] - \frac{n^2}{2} \right) \quad (Ec. 13)$$

Por propiedades de sumatoria:

$$\sum_{i=0}^n [i] = \frac{n(n-1)}{2}$$

Entonces

$$\gamma = \frac{K_c}{n} \left(\sum_{i=0}^n [i] - \frac{n^2}{2} \right) = \frac{K_c}{n} \left(\frac{n(n-1)}{2} - \frac{n^2}{2} \right) = \frac{K_c}{2} \quad (Ec. 14)$$

Sustituyendo la Ec. 12 y Ec. 14 en la Ec. 11, se obtiene la ecuación 16 que es base para el análisis que se llevará a cabo para encontrar la frecuencia óptima de mantenimiento.

$$C_a(n) = \gamma \cdot n - m \cdot P.E. \cdot \frac{n^2}{2} = \frac{K_c}{2} \cdot n + \frac{K_c}{2} n^2 \quad (Ec. 15)$$

Como recordatorio, estas ecuaciones solamente aplican si la pérdida de eficiencia es lineal y se usan unidades de energía y costo por unidad de energía como promedios y constantes en todo el análisis.

- Frecuencia de mantenimiento

Es necesario encontrar una forma de optimizar la frecuencia de mantenimiento. Por lo que, se analiza la pendiente de crecimiento de las curvas y se puede analizar como un triángulo (Figura 3.1), como se muestra a continuación:

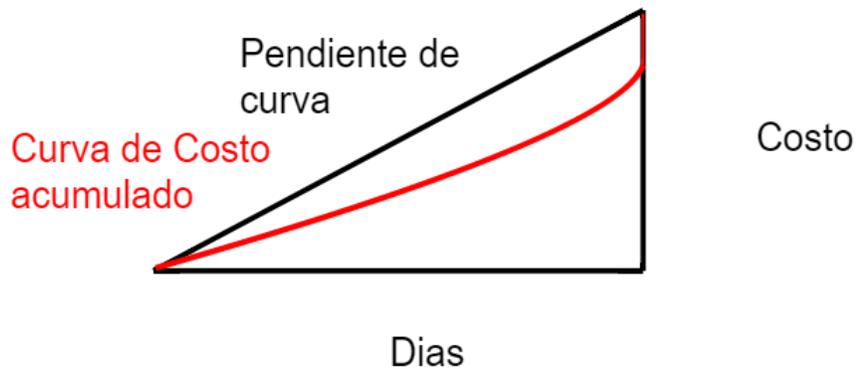


Figura 3.1 Triángulo de costo acumulado de mantenimiento

La curva de color rojo, representa la medición de pérdida económica por 1 periodo entre mantenimientos.

Se analiza de esta manera, debido a que el costo del mantenimiento afecta la frecuencia de mantenimiento, por que disminuye el retorno de la inversión. Una vez establecido lo anterior, se trata de encontrar la menor pendiente posible, pues presenta el mayor ahorro.

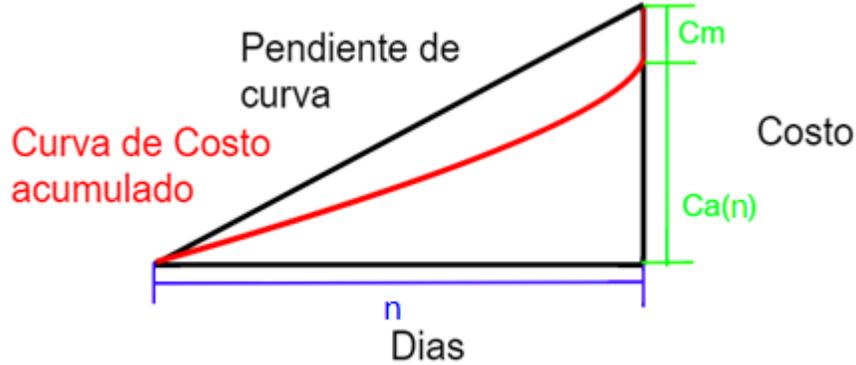


Figura 3.2 Triángulo de costo de mantenimiento con descripciones

Siendo las descripciones de los símbolos de la Figura 3.2, los siguientes:

$n =$ Dias del periodo de la frecuencia del mantenimiento.

$C_a(n) =$ Costo acumulado evaluado en el periodo de la frecuencia de mantenimiento.

$C_m =$ Costo de mantenimiento (Constante)

Aplicando la fórmula del punto pendiente:

$$m_n = \frac{\text{Costo}}{\text{Dias}} = \frac{C_a(n) + C_m}{n} \quad (\text{Ec. 16})$$

Sustituyendo la ecuación del Costo acumulado (Ec. 15.) en la ecuación de la pendiente (Ec. 16.) y reduciendo obtenemos:

$$m_n = \frac{\left(\frac{K_c}{2} \cdot n + \frac{K_c}{2} n^2\right) + C_m}{n} = \frac{K_c}{2} n + \frac{K_c}{2} + \frac{C_m}{n} \quad (\text{Ec. 17})$$

Finalmente optimizando la ecuación (Ec. 17.) utilizando la primera derivada de la función e igualándola a 0, obtenemos:

$$\frac{d(m_n)}{dn} = \frac{d\left(\frac{K_c}{2} n + \frac{K_c}{2} + \frac{C_m}{n}\right)}{dn} = \frac{K_c}{2} - \frac{C_m}{n^2}$$

$$\frac{d(m_n)}{dn} = \frac{K_c}{2} - \frac{C_m}{n^2} = 0 \quad (\text{Ec. 18})$$

Despejando la frecuencia de la ecuación 18, se obtiene:

$$n = \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Con la ecuación 19 se puede determinar la frecuencia óptima de mantenimiento. Es decir el número de días a los cuales se debe realizar el mantenimiento para tener los menores costos de pérdidas de eficiencia y costos de mantenimiento.

- Monitoreo por condición

Este monitoreo aplica para equipos en los cuales frecuencia de mantenimiento dependa del valor de un parámetro crítico de operación (temperatura, presión, flujo, etc.). A partir de la frecuencia óptima de mantenimiento conocida (Ec. 19), se puede trasladar esta ecuación y evaluarla en la ecuación de eficiencia (Ec. 4).

$$e(n) = e_m + m \cdot n = e_m + m \cdot \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}} \quad (\text{Ec. 20})$$

Posteriormente utilizando la ecuación que relaciona el parámetro crítico de operación con la eficiencia, que es característica de cada equipo, podemos conocer el valor de dicho parámetro que optimiza el retorno de inversión, tal que ahora se puede mantener un monitoreo de condición.

Evaluando la eficiencia (Ec. 20.) en la ecuación lineal que relaciona el valor del parámetro crítico con la eficiencia (Ec. 3.) y despejando el parámetro, obtenemos la ecuación 21.

$$y(x) = e(n)$$

$$M \cdot x + b = e_m + m \cdot \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}}$$

$$x = \frac{e_m + m \cdot \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}} - b}{M} \quad (\text{Ec. 21})$$

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los resultados de los sistemas, se presentarán sub capítulos.

4.1 Modelo de mantenimiento basado en eficiencia para una caldera

Las especificaciones del equipo que se analizó se muestran en la tabla 4.1:

Descripción del equipo analizado	
Código de equipos	Caldera 3
Potencia	50 BHP
Modelo	Wee Chieftain
Marca	Cochran
Consumo nominal	12.5 gph
Flujo máximo	784 kg/h
Presión máxima de trabajo	150 psig

Tabla 4.1 Especificaciones de caldera

Se realizó una recopilación de datos desde el 30/01/2016 hasta el 01/08/2016, resumidos en la tabla 4.2:

Datos medidos		
Medición	Descripción	Unidades
Combustible	El combustible diario utilizado por la caldera	galones (g)
Temperatura	Temperatura de chimenea cada minuto	Celsius (C)
Presión	Presión manométrica de la línea por minuto	psig (psi)
Eficiencia	Eficiencia antes y después mantenimientos	%

Tabla 4.2 Datos medidos de la caldera

A continuación las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, muestran los datos a analizar, los datos completos pueden encontrarse en el disco adjunto que forma parte integral del presente documento.

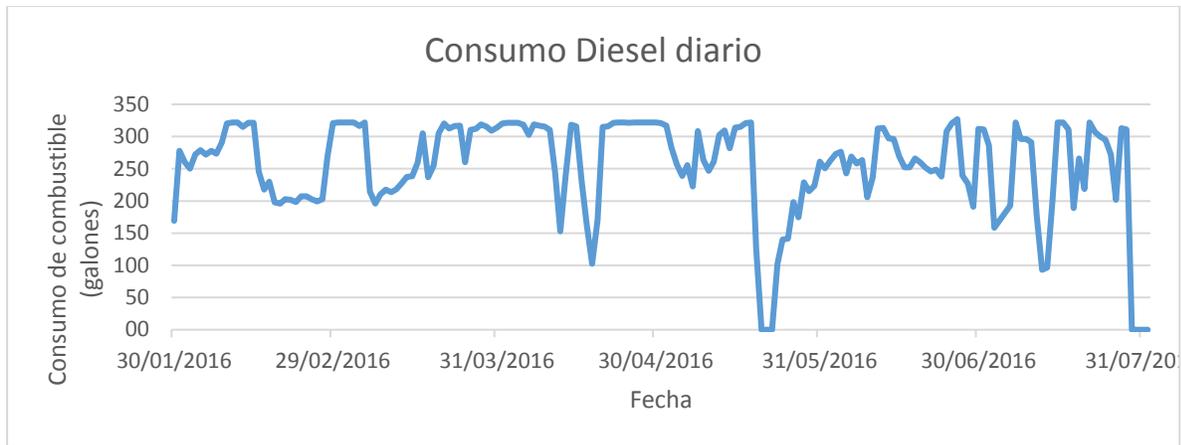


Figura 4.1 Grafica de consumo de diésel diario



Figura 4.2 Presión de línea en psi

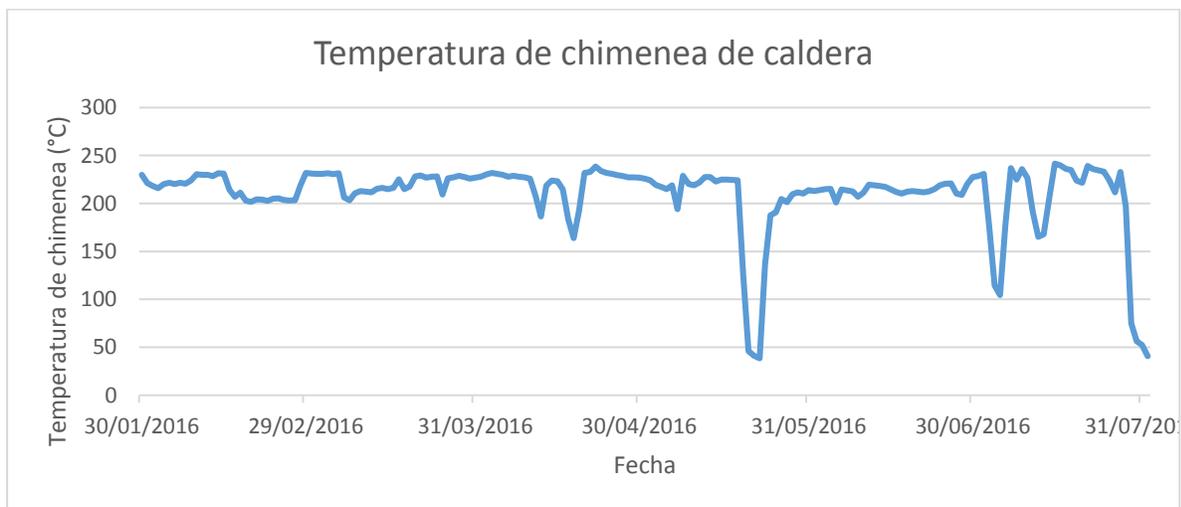


Figura 4.3 Temperatura de chimenea de caldera

4.1.1 Mantenimiento de la caldera a analizar

Para el caso de estudio, se analizó el mantenimiento de lado de fuego del equipo, que es el que posee mayor impacto en el rendimiento y eficiencia en el consumo de combustible.

Este mantenimiento consta de los siguientes pasos:

1. Apagado de la caldera
2. Espera para enfriamiento
3. Apertura de lado de fuego de la caldera
4. Limpieza con hidrolavadora
5. Limpieza con cepillo
6. Cambio de filtro de diésel y limpieza de bomba de diésel.
7. Cambio de empaquetadura.
8. Cambio de tubos visores.
9. Engrase de pernería y cierre.
10. Calentamiento hasta punto de trabajo.

El costo de este mantenimiento se encuentra descrito en la siguiente tabla 4.3:

Costeo de mantenimiento del lado de fuego		
Ítem	Descripción	Costo
Mano de obra	1 técnico calderero + 2 ayudantes (1 día)	\$ 44.00
Herramientas	Cepillo para limpieza de 2 1/2 más cable de acero	\$ 35.00
Juego de empaques	Trenza cuadrada y trenza redonda teflonada	\$ 130.00
Agua	4 metros cúbicos de agua	\$ 8.00
Diésel de calentamiento	37 galones de diésel	\$ 84.00
Wipe	Para limpieza	\$ 12.00
Filtro	Cambio de repuesto de filtro	\$ 35.00
Otros	Grasa grafitada y desengrasantes	\$ 12.00
	TOTAL=	\$ 360.00

Tabla 4.3 Costo de mantenimiento del lado de fuego

Actualmente dicho mantenimiento se basa en condición y se programa cuando la temperatura de chimenea sobrepasa los 250 grados Celsius (482 grados Fahrenheit).

4.1.2 Línea base del sistema

Para establecer la línea base de este sistema, se realizó un mantenimiento y se tomaron medición de eficiencia de la transferencia de los gases de chimenea al vapor cuyos datos se presentan en la tabla 4.4. La medición la realizó la empresa Hidrotérmica S.A de C.V.

Día de mantenimiento 5/23/2016		
Medición después de mantenimiento		
Fecha	T máx. (F)	Eficiencia medida
5/24/2016	419	86.5%
Medición antes de mantenimiento		
Fecha	T máx. (F)	Eficiencia medida
5/12/2016	470	82.0%

Tabla 4.4 Medición de eficiencia

Al conocer la eficiencia obtenida antes del mantenimiento, y la eficiencia obtenida después del mantenimiento, se puede aplicar el procedimiento el método de medición indirecta de eficiencia por temperatura de chimenea, basado en el documento “ASME PTC-4” (Tabla 4.5).

Eficiencias basadas en temperatura de chimenea y exceso de oxígeno(Para Diesel)														
		Temperatura en Farenheit												
CO	O2	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	550	600
15.6	0	88.0	87.6	87.2	86.8	86.4	86.0	85.6	85.2	84.8	84.4	84.0	83.0	82.1
14.1	2	87.5	87.1	86.6	86.2	85.8	85.3	84.9	84.5	84.0	83.6	83.2	82.1	81.0
13.4	3	87.2	86.8	86.3	85.9	85.4	85.0	84.5	84.1	83.6	83.2	82.7	81.6	80.5
12.6	4	86.9	86.4	85.9	85.4	85.0	84.5	84.0	83.5	83.1	82.6	82.1	80.9	79.7
11.9	5	86.5	86.0	85.5	85.0	84.5	84.0	83.5	83.0	82.5	82.0	81.5	80.3	79.0
11.1	6	86.0	85.5	85.0	84.5	83.9	83.4	82.9	82.3	81.8	81.3	80.7	79.4	78.1
10.4	7	85.6	85.0	84.5	83.9	83.3	82.8	82.2	81.7	81.1	80.5	80.0	78.6	77.2
9.6	8	85.0	84.4	83.8	83.2	82.6	82.0	81.4	80.8	80.2	79.6	79.0	77.5	76.0
		Región lineal												

Tabla 4.5 Tabla de eficiencias basadas en temperatura de chimenea

Con la tabla 4.5 podemos obtener la gráfica que se presenta en la figura 4.4

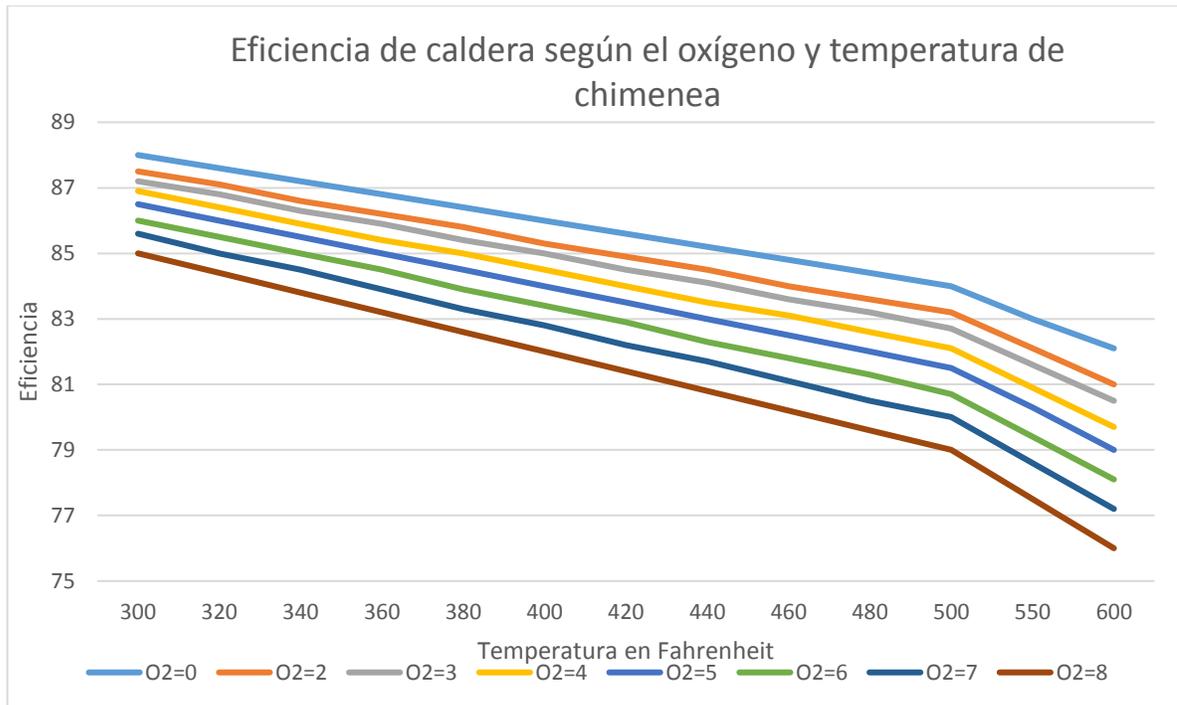


Figura 4.4 Gráfica de eficiencias de Oxígeno vrs Temperatura de chimenea

Por lo anterior, si nos mantenemos dentro de la región lineal de operación, podemos hacer una muy buena aproximación de las líneas de eficiencia. Esta región abarca desde los 300 hasta los 500 grados Fahrenheit.

Utilizando las ecuaciones 1, 2 y 3 se puede escribir una ecuación que representa la pérdida de eficiencia según temperatura de chimenea.

$$m = \frac{(e_{T_2} - e_{T_1})}{(T_2 - T_1)} = \frac{(0.865 - 0.820)}{(419 - 470)} = -0.000882$$

Para una temperatura de 419°C, se obtuvo una eficiencia de 86.5%, sustituyendo esos valores en la ecuación 2:

$$b = y(x) - m \cdot x = 0.865 - (-0.000882)(419) = 1.235$$

Ahora se conoce completamente la ecuación lineal que relaciona temperatura y eficiencia, que es propia del equipo. Con valores de temperatura en °C que se encuentren en la región lineal.

$$e_T(T) = -0.000882.T + 1.235; \text{ en el rango de } 300^{\circ}\text{C a } 500^{\circ}\text{C}$$

Utilizando la ecuación de eficiencia podemos conocer, la eficiencia del equipo para cualquier momento, sabiendo la temperatura máxima de chimenea.

Posteriormente, se construye la serie de datos de eficiencia diario para la caldera como se presenta en la figura 4.5.



Figura 4.5 Valores de eficiencia diaria de caldera

4.1.3 Modelo de predicción de pérdida de eficiencia

De la nueva serie de datos, debe de seleccionarse el rango de fechas a evaluar, tratando de eliminar, puntos que no sean estadísticamente representativos o eventos que interfieran el análisis. Se realiza una regresión lineal para conocer la razón de pérdida de eficiencia en el tiempo (Figura 4.6).

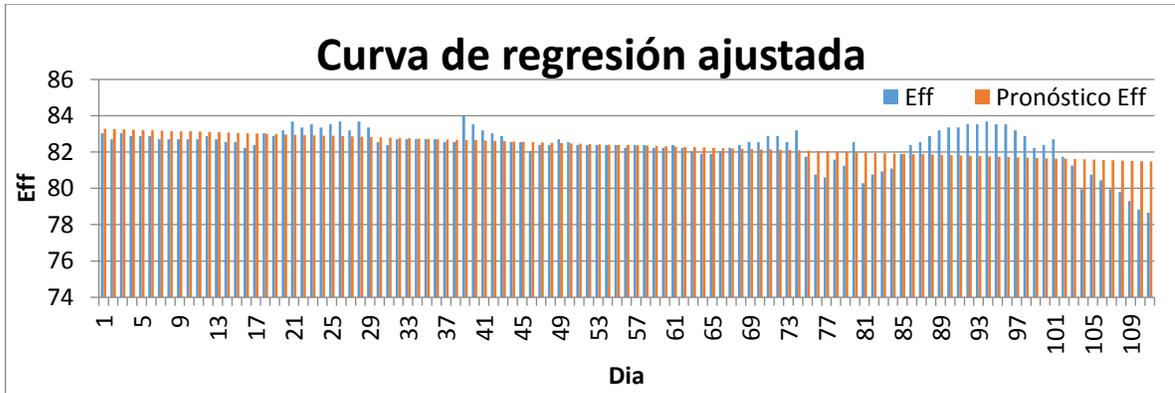


Figura 4.6 Curva de regresión lineal para la pérdida de eficiencia en el tiempo

Una vez obtenida la regresión lineal a través del paquete estadístico que facilita el software de Microsoft Excel, se puede iniciar a construir el modelo de predicción de pérdida económica basado en el aumento de la temperatura de una caldera, que servirá como principal indicador del modelo.

De la regresión lineal de la figura 4.6 se obtienen los siguientes datos del comportamiento lineal:

$$m = -0.0001638$$

$$b = 0.833$$

Con estos datos se puede obtener el valor de eficiencia a medida pasa el tiempo desde el último mantenimiento así como lo presenta la ecuación 4.

$$e(n) = e_m + m.n = 0.833 - (0.0001638)n$$

Ahora se saca el costo por ineficiencia por medio de la ecuación 5 para cada día pasado desde el mantenimiento con los siguientes datos:

- Consumo diario promedio de combustible: 273.86 galones
- Costo de combustible por galón: 2.1 USD/gal

Luego se calcula el costo acumulado para todos los días que han pasado desde el último mantenimiento.

4.1.4 Frecuencia de mantenimiento

Para este análisis se utilizó la ecuación 19, para obtener la frecuencia óptima de mantenimiento. A continuación se presentan una gráfica (Figura 4.7) comparativa entre frecuencias de mantenimiento comunes en la planta.

Con un valor de costo de mantenimiento de \$360.00

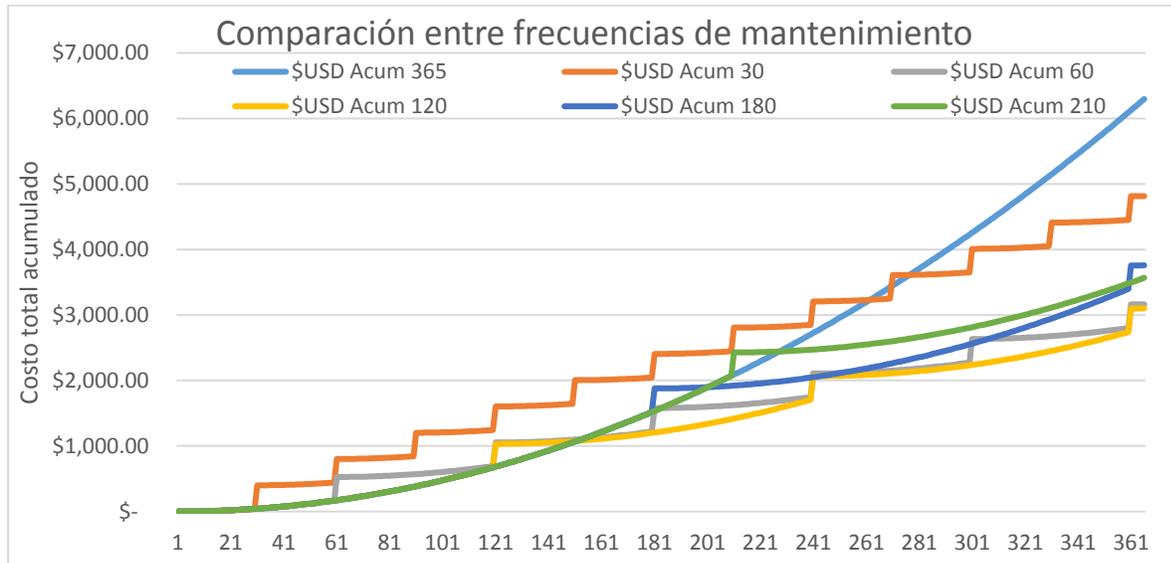


Figura 4.7 Comparación de frecuencias de mantenimiento

Como se puede observar, las distintas curvas, demuestran que para varias frecuencias existen pérdidas económicas, sea por la falta de mantenimiento o por el exceso de mantenimiento. Sustituyendo la ecuación 12 en la ecuación 19, tenemos:

$$n = \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}} = \sqrt{\frac{2(360)}{-(-0.0001638)(2.1)(273.86)}} = 87.40 \text{ días} \approx 88 \text{ días}$$

4.1.5 Monitoreo de condición

Utilizando la ecuación 21 y definiendo como parámetro crítico la temperatura de la caldera, sustituimos los valores:

$$T = \frac{e_m + m \cdot \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}} - b}{M} = \frac{0.833 + (-0.0001638)(87.40) - 1.235}{(-0.000882)} = 472.01^\circ\text{C}$$

Es decir que, por monitoreo de condición se debe realizar el mantenimiento cuando la temperatura de la chimenea esté arriba de los 472.01°C. Por el comportamiento de la caldera a esta temperatura, la eficiencia ha bajado tanto como si hubieran pasado 88 días desde el último mantenimiento y es necesario realizar nuevamente el mantenimiento descrito para evitar mayores pérdidas por ineficiencia del sistema.

4.1.6 Indicadores

Los indicadores que se consideran utilizar para el control y monitoreo del equipo son los que se presentan en la tabla 4.6.

Nombre	Cálculo	Unidades
Eficiencia de vapor generado	Presión de vapor generado/Presión de vapor nominal	%
Eficiencia de combustible	1- (Galones de combustible perdido/Galones de combustible consumido)	%
Temperatura de chimenea	Medición física de temperatura de chimenea	°C

Tabla 4.6 Indicadores de control y monitoreo de caldera.

4.2 Modelo de mantenimiento basado en eficiencia para un sistema de refrigeración tipo “chiller”

Las especificaciones del equipo que se analizó se muestran en la tabla 4.7:

Descripción del equipo analizado	
Código de equipos	Compresor2
Potencia	200 TR
Modelo	RTAC-200 HE
Marca	Trane
Voltaje Nominal	440V , 3F

Tabla 4.7 Datos del chiller

Se realizó una recopilación de datos desde el 11/02/2016 hasta el 01/08/2016, las mediciones que se realizaron se presentan en la tabla 4.8.

Datos medidos		
Medición	Descripción	Unidades
Consumo	El consumo de energía por hora	Kilowatts por hora (kWh)
Refrigeración	Toneladas de refrigeración que entrega la máquina	Toneladas de refrigeración (TR)
Temperatura Ambiente	Medición de Temperatura ambiente	Celsius (°C)
Eficiencia	Eficiencia del equipo	%

Tabla 4.8 Datos medidos del chiller

A continuación las figuras 4.8, 4.9 y 4.10, muestran los datos a analizar, los datos completos pueden encontrarse en el disco adjunto que forma parte integral del presente documento.

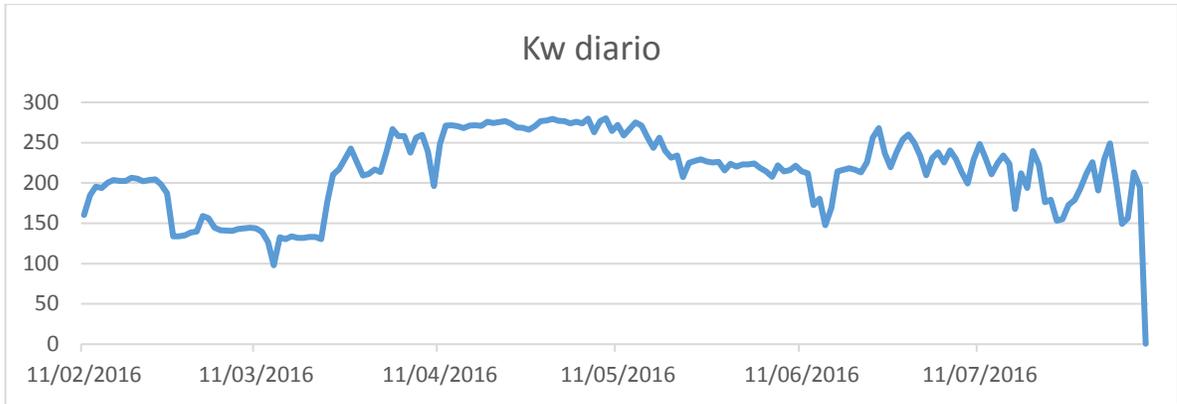


Figura 4.8 Gráfica de consumo de energía diaria

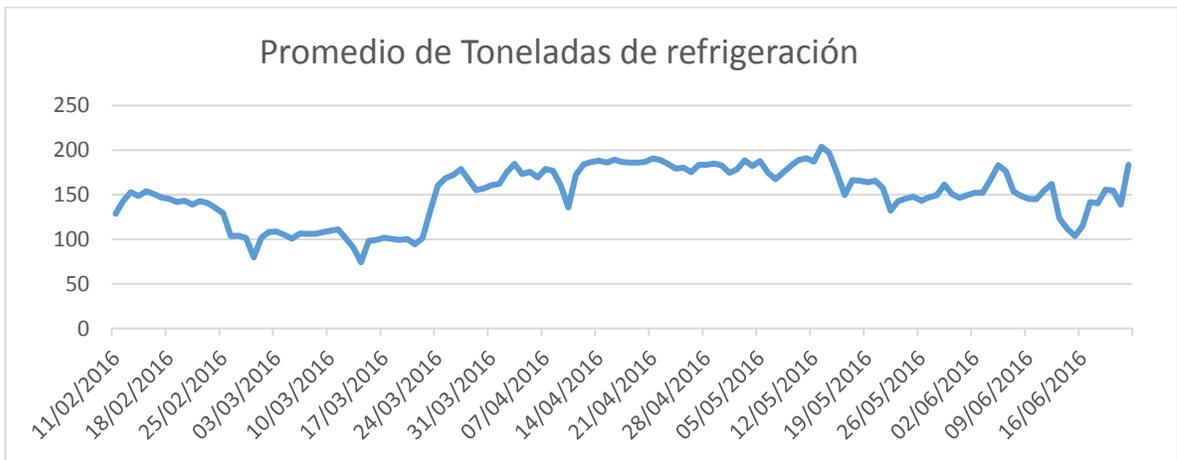


Figura 4.9 Gráfica de promedio de toneladas de refrigeración diaria

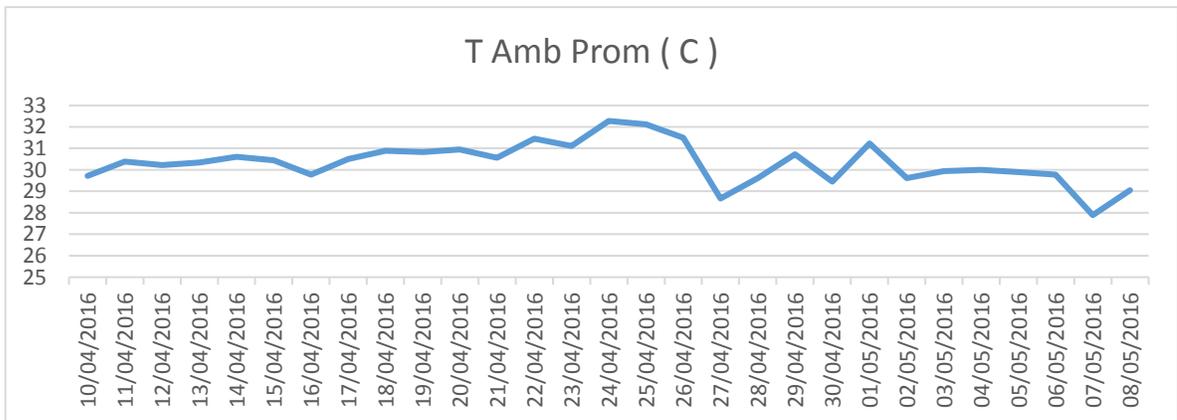


Figura 4.10 Gráfica de temperatura ambiente promedio diaria

4.2.1 Mantenimiento del “chiller” a analizar

Para el caso de estudio, se analizará el mantenimiento que incluye la limpieza en 2 lados del chiller, que es el que posee mayor impacto en el rendimiento y eficiencia en el consumo de energía.

Este mantenimiento consta de los siguientes pasos:

1. Apagado del chiller.
2. Desconexión eléctrica (Bajar interruptores eléctricos por seguridad).
3. Apertura del equipo.
4. Limpieza con hidrolavadora.
5. Limpieza con químicos.
6. Limpieza aire comprimido.
7. Armado del equipo.
8. Prueba de funcionamiento.

El costo de este mantenimiento se encuentra descrito en la siguiente tabla 4.9:

Costeo de mantenimiento del chiller		
Ítem	Descripción	Costo
Mano de obra	1 técnico + 1 ayudantes (2 días)	\$ 92.00
Agua	35 metros cúbicos de agua	\$ 75.25
Aire comprimido	Aire comprimido para limpieza	\$ 20.00
Químicos	Ácido limpiador 25 galones	\$ 340.00
	Detergente neutro 25 galones	\$ 225.00
Otros	Equipo de protección personal	\$ 28.00
	TOTAL=	\$ 780.25

Tabla 4.9 Costo de mantenimiento de chiller

4.2.2 Línea base del sistema

Para establecer la línea base de este sistema, se realizó un mantenimiento y se tomaron medición de eficiencia de la refrigeración generada que se muestran en la tabla 4.10. Estos equipos se miden a través del COP que es el coeficiente de desempeño (Coefficient of Performance), que se refiere a la relación entre el enfriamiento generado y la energía consumida.

Día de mantenimiento 10/04/2016-11/04/2016				
Medición después de mantenimiento				
Fecha	P prom (kW ele)	P prom TR(kW ref)	T Día	COP
12/04/2016	271	644.135	30.22	2.376
Medición antes de mantenimiento				
Fecha	P prom (kW ele)	P prom TR(kW ref)	T Día	COP
09/04/2016	238.87	564.638	30.11	2.363

Tabla 4.10 Datos antes y después de mantenimiento del chiller

Se tomaron tres datos de temperatura ambiente para ver de qué manera afecta la temperatura de salida del agua del evaporador como se muestra en la tabla 4.11.

T AMB	T OUT	COP
37.2	8.39	2.608
30.8	8.56	2.672
27.0	8.00	3.357

Tabla 4.11 Muestras de temperatura ambiente y temperatura de salida del agua.

Se observa que en el rango de temperatura ambiente la variación de la temperatura de salida del agua del evaporador es baja, sin embargo se realiza la interpolación para determinar el valor de temperatura que tendría el agua para cada valor de temperatura ambiente en ese rango. De igual manera se realiza con el COP para determinar los valores reales de desempeño que tuvo para cada día este sería un COP real.

Performance Data

Table P-2 - High Efficiency Units (SI Units)

		Entering Condenser Air Temperature (°C)														
		30			35			40			45			52		
Evaporator Leaving Water Temperature (°C)	Model and Size	Cooling Capacity (kW)	Power Input (kW)	COP	Cooling Capacity (kW)	Power Input (kW)	COP	Cooling Capacity (kW)	Power Input (kW)	COP	Cooling Capacity (kW)	Power Input (kW)	COP	Cooling Capacity (kW)	Power Input (kW)	COP
		5	120 HE	421.6	112.9	3.33	394.9	122.1	2.91	367.1	132.4	2.52	338.9	144.0	2.16	298.2
130 HE	465.9		124.1	3.34	436.3	134.2	2.92	406.5	145.5	2.53	375.5	158.0	2.17	329.5	176.6	1.72
140 HE	511.9		135.6	3.35	480.6	146.7	2.94	448.3	159.0	2.55	415.2	172.6	2.20	361.1	190.3	1.75
155 HE	557.3		150.1	3.30	523.2	161.9	2.90	488.0	175.1	2.53	452.2	189.7	2.18	394.1	209.0	1.74
170 HE	603.0		164.6	3.26	566.4	177.1	2.87	528.5	191.2	2.50	489.4	206.8	2.16	425.1	226.5	1.73
185 HE	669.1		180.6	3.30	629.7	194.2	2.92	588.9	209.5	2.55	547.1	226.4	2.21	463.8	240.7	1.77
200 HE	736.3		196.8	3.34	693.7	211.4	2.96	649.8	227.8	2.59	604.4	246.0	2.25	509.5	259.1	1.81
250 HE	886.4		239.3	3.33	833.3	258.0	2.93	778.4	278.9	2.55	722.2	301.8	2.20	515.1	274.0	1.72
275 HE	991.9		265.6	3.35	933.5	285.3	2.96	873.0	307.4	2.59	810.8	331.9	2.25	679.3	348.5	1.80
300 HE	1114.9		296.9	3.38	1052.3	318.6	2.99	986.9	343.0	2.63	919.1	370.0	2.29	757.7	379.8	1.84
350 HE	1225.0	332.0	3.29	1151.5	356.9	2.90	1075.5	384.9	2.53	997.1	415.9	2.19	844.2	442.8	1.75	
375 HE	1354.7	364.2	3.32	1275.6	391.1	2.94	1193.7	421.2	2.57	1109.3	454.6	2.23	917.8	471.1	1.79	
400 HE	1484.5	396.6	3.34	1399.7	425.3	2.97	1311.5	457.5	2.61	1220.8	493.2	2.27	1003.8	505.7	1.82	
7	120 HE	451.5	117	3.45	423.3	126.4	3.03	394.1	136.9	2.62	363.9	148.6	2.25	303.1	157.6	1.78
	130 HE	498.9	128.7	3.46	468.0	138.9	3.04	436.0	150.4	2.64	403.6	163.1	2.27	336.8	172.4	1.80
	140 HE	547.8	140.6	3.47	514.7	151.8	3.05	480.6	164.3	2.66	445.8	178.0	2.29	367.1	184.4	1.83
	155 HE	595.6	155.8	3.41	559.4	167.7	3.01	522.5	181.0	2.62	484.9	195.8	2.27	399.8	202.5	1.82
	170 HE	644.1	171.1	3.37	605.1	183.7	2.97	565.0	197.9	2.60	523.9	213.6	2.25	432.5	220.5	1.80
	185 HE	714.1	187.8	3.41	672.3	201.5	3.01	629.4	216.9	2.64	585.1	234.1	2.29	472.6	234.8	1.85
	200 HE	785.8	204.7	3.44	740.8	219.5	3.05	694.4	236.1	2.68	646.2	254.6	2.33	517.9	252.3	1.89
	250 HE	945.5	248.5	3.4	889.5	267.5	3.0	831.9	288.6	2.64	772.5	311.9	2.29	520.0	265.4	1.79
	275 HE	1057.6	276.1	3.45	995.7	296	3.06	932.1	318.4	2.68	866.7	343.2	2.33	691.9	339.6	1.88
	300 HE	1188.1	308.7	3.47	1122.0	330.8	3.09	1053.0	355.5	2.71	981.7	383.0	2.37	768.6	368.7	1.92
350 HE	1306.5	345	3.39	1228.8	370.2	3	1148.7	398.4	2.62	1066.4	429.7	2.28	857.9	430.1	1.83	
375 HE	1444.7	378.7	3.42	1361.4	405.9	3.03	1274.9	436.4	2.66	1185.9	470.3	2.32	934.9	458.5	1.87	
400 HE	1582.9	412.6	3.44	1493.6	441.8	3.06	1400.8	474.5	2.69	1304.8	510.8	2.35	1019.3	491.1	1.90	
9	120 HE	482.4	121.4	3.57	452.2	130.9	3.13	421.6	141.5	2.72	389.9	153.4	2.34	307.0	152.0	1.86
	130 HE	533.0	133.5	3.58	500.3	143.9	3.15	466.9	155.5	2.74	432.5	168.3	2.36	340.7	166.1	1.89
	140 HE	584.7	145.8	3.59	549.9	157.1	3.16	514.0	169.7	2.76	477.5	183.5	2.39	374.1	178.8	1.92
	155 HE	635.0	161.7	3.52	597.0	173.7	3.11	558.0	187.2	2.72	518.3	202.1	2.36	403.6	194.8	1.90
	170 HE	686.3	177.8	3.46	645.2	190.6	3.06	602.6	204.8	2.68	559.4	220.7	2.33	438.5	213.2	1.89
	185 HE	760.5	195.2	3.50	716.2	209.1	3.11	670.9	224.7	2.73	624.1	242.0	2.37	479.2	227.4	1.93
	200 HE	837.2	212.9	3.54	789.3	227.9	3.14	740.1	244.8	2.77	689.5	263.5	2.41	525.6	244.8	1.97
	250 HE	1006.3	258.0	3.53	947.2	277.3	3.12	886.7	298.7	2.73	824.2	322.3	2.37	528.5	259.5	1.85
	275 HE	1124.8	287.0	3.55	1060.1	307.2	3.15	992.9	329.8	2.77	924.0	354.9	2.41	699.7	328.5	1.96
	300 HE	1262.9	320.9	3.57	1193.3	343.3	3.17	1120.9	368.5	2.80	1045.7	396.5	2.44	777.7	358.1	2.00
350 HE	1389.5	358.4	3.48	1308.3	383.9	3.09	1223.9	412.4	2.71	1137.4	443.9	2.36	871.3	417.4	1.91	
375 HE	1536.8	393.7	3.51	1448.9	421.3	3.12	1358.2	452.2	2.75	1264.7	486.5	2.39	943.7	443.3	1.95	
400 HE	1684.2	429.2	3.54	1589.9	458.9	3.15	1492.5	492.1	2.78	1391.3	529.1	2.42	1031.6	477.2	1.98	

Notes :

1. Ratings based on sea level altitude and evaporator fouling factor of 0.0176 m²K/kW
2. Consult Trane representative for performance at temperatures outside of the ranges shown
3. kW input = compressor power input only.
4. COP = Coefficient of Performance (kW/kW). The considered power input includes compressors, condenser fans and control power.
5. Ratings are based on an evaporator temperature drop of 5°C.
6. Interpolation between points is permissible. Extrapolation is not permitted.
7. Operation above 40°C = with High Ambient Option.

Figura 4.11 Datos de desempeño según temperatura

Con los datos de desempeño que se muestra en la figura 4.11 se observa que el coeficiente de desempeño depende mucho de la temperatura ambiente. Se han marcado en rojo los datos que corresponden al modelo del equipo analizado: 200 HE.

Utilizando los valores del COP y las temperaturas ambiente y de salida del agua de la figura 4.11 (valores ideales, con el 100% de eficiencia), se realizan dos interpolaciones para determinar el coeficiente de desempeño para cada valor de temperatura ambiente y cada valor de salida de agua. Se sacan los datos de la figura 4.11 para obtener las tablas 4.12 y 4.13 para interpolación a 30°C y 35°C respectivamente donde las variables independientes son la temperatura del agua y las variables dependientes el COP.

INTERPOLACIÓN COP 30°C			
X1	7°C	Y1	3.44
X2	9°C	Y2	3.54

Tabla 4.12 Interpolación para COP 30°C

INTERPOLACIÓN COP 35°C			
X1	7°C	Y1	3.05
X2	9°C	Y2	3.14

Tabla 4.13 Interpolación para COP 35°C

Para la interpolación se utilizan las ecuaciones 1, 2 y 3 con las cuales se puede escribir una ecuación que representa el comportamiento del COP con respecto a la temperatura de salida del agua.

- Para 30°C de temperatura ambiente:

$$m = \frac{(COP_2 - COP_1)}{(T_{SAL2} - T_{SAL1})} = \frac{(3.54 - 3.44)}{(9 - 7)} = 0.05$$

Para una temperatura de 9°C, se obtuvo un COP de 3.54, sustituyendo esos valores en la ecuación 2:

$$b = y(x) - m \cdot x = 3.54 - (0.05)(9) = 3.09$$

Ahora se conoce completamente la ecuación lineal que relaciona temperatura salida del agua y el COP. Con valores de temperatura en °C.

$$COP(T)_{30°C} = 0.05(T) + 3.09$$

- Para 35°C de temperatura ambiente:

$$m = \frac{(COP_2 - COP_1)}{(T_{SAL2} - T_{SAL1})} = \frac{(3.14 - 3.05)}{(9 - 7)} = 0.045$$

Para una temperatura de 9°C, se obtuvo un COP de 3.14, sustituyendo esos valores en la ecuación 2:

$$b = y(x) - m \cdot x = 3.14 - (0.045)(9) = 2.735$$

Ahora se conoce completamente la ecuación lineal que relaciona temperatura salida del agua y el COP. Con valores de temperatura en °C.

$$COP(T)_{35^\circ C} = 0.045(T) + 2.735$$

Finalmente hacemos una tercera interpolación entre el COP a 30° y el COP a 35°C según los datos de la tabla 4.14 para obtener el valor de COP a una temperatura ambiente diferente de 30°C o 35°C.

INTERPOLACION			
X1	30	Y1	COP a 30°C
X2	35	Y2	COP a 35°C

Tabla 4.14 Interpolación entre COP a 30°C y COP a 35°C

Utilizando la ecuación 1, 2 y 3, podemos determinar el COP para cualquier temperatura ambiente, sabiendo la temperatura de salida.

$$m = \frac{(COP_{35^\circ C} - COP_{30^\circ C})}{(T_{AMB2} - T_{AMB1})} = \frac{(COP_{35^\circ C} - COP_{30^\circ C})}{(35 - 30)} = \frac{(COP_{35^\circ C} - COP_{30^\circ C})}{5}$$

$$b = y(x) - m \cdot x = COP_{35^\circ C} - \left(\frac{(COP_{35^\circ C} - COP_{30^\circ C})}{5} \right) (35)$$

$$COP(T) = \frac{(COP_{35^\circ C} - COP_{30^\circ C})}{5} (T) + COP_{35^\circ C} - \left(\frac{(COP_{35^\circ C} - COP_{30^\circ C})}{5} \right) (35)$$

$$COP(T)_{ideal} = \left(\frac{(COP_{35^\circ C} - COP_{30^\circ C})}{5} \right) (T - 35) + COP_{35^\circ C} \quad (Ideal)$$

Este procedimiento se realiza para cada valor de temperatura de salida y para cada valor de temperatura ambiente. Recordando que estos son valores según tablas (Ideales)

Para obtener el COP real se utilizan los datos de la tabla 4.11, realizando la interpolación como se hizo anteriormente con las ecuaciones 1, 2 y 3, tomando para ello los datos de la tabla 4.15.

INTERPOLACION			
X1	37.2	Y1	2.608
X2	30.8	Y2	2.672

Tabla 4.15 Datos para interpolación de COP real

$$m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{(2.608 - 2.672)}{(30.8 - 37.2)} = \frac{-0.064}{-6.4} = 0.01$$

$$b = y(x) - m \cdot x = 2.608 - (0.01)(30.8) = 2.3$$

$$COP(T)_{real} = 0.01 (T) + 2.3 \quad (Real)$$

Este procedimiento se realiza para cada valor de temperatura ambiente.

Ahora que tenemos ambos coeficientes de desempeño (Real e Ideal), la eficiencia la calculamos con la ecuación 22.

$$\%EF = \frac{COP_{real}}{COP_{ideal}} \times 100 \quad (Ec. 22)$$

Posteriormente, se construye la serie de datos de eficiencia diario del chiller como se presenta en la figura 4.12.

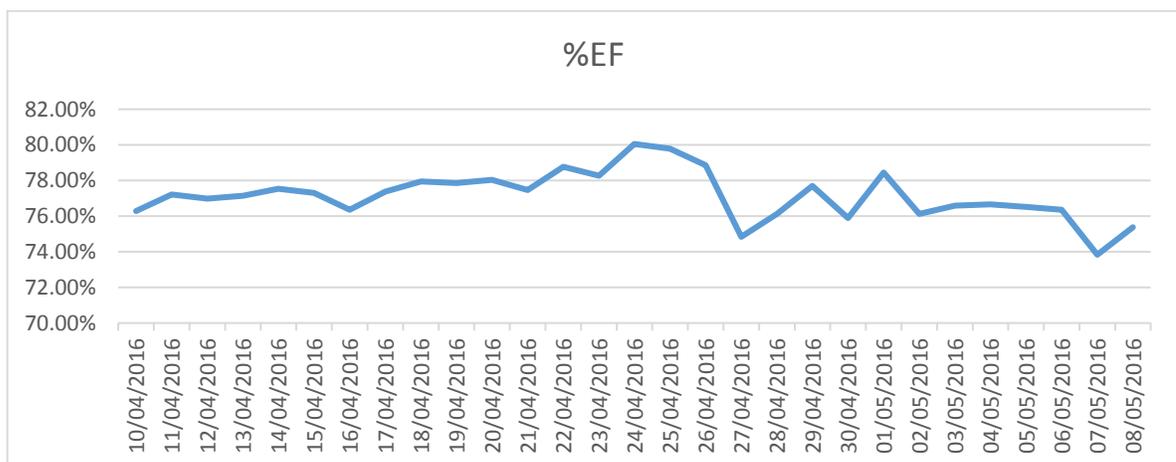


Figura 4.12 Gráfica de eficiencia de chiller.

4.2.3 Modelo de predicción de pérdida de eficiencia

De la nueva serie de datos de eficiencia, debe de seleccionarse el rango de fechas a evaluar, tratando de eliminar, puntos que no sean estadísticamente representativos o eventos que interfieran el análisis.

Con la serie de datos seleccionada, se realiza una regresión lineal para conocer la razón de pérdida de eficiencia en el tiempo estimada para futuros eventos que se muestra en la figura 4.13.

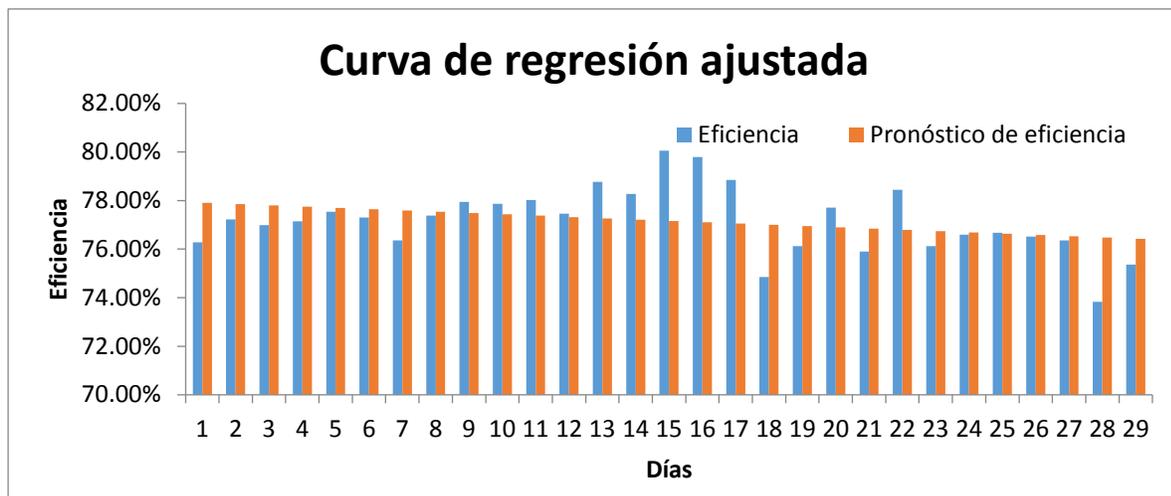


Figura 4.13 Curva de regresión ajustada

De la regresión lineal de la figura 4.13 se obtienen los siguientes datos del comportamiento lineal:

$$m = -0.0005306$$

$$b = 0.779$$

Con estos datos se puede obtener el valor de eficiencia a medida pasa el tiempo desde el último mantenimiento así como lo presenta la ecuación 4.

$$e(n) = e_m + m \cdot n = 0.779 - (0.0005306)n$$

Ahora se saca el costo por ineficiencia por medio de la ecuación 5 para cada día pasado desde el mantenimiento con los siguientes datos:

- Consumo diario promedio de energía por hora es de: 269.61kW
 - Consumo Punta: $269.61\text{kW} \times 5\text{h} = 1348.05 \text{ kWh}$
 - Consumo Resto: $269.61\text{kW} \times 13\text{h} = 3504.93 \text{ kWh}$
 - Consumo Valle: $269.61\text{kW} \times 6\text{h} = 1617.66 \text{ kWh}$

- Costo de energía por kWh:

Período	01/01/16 - 14/01/16	15/01/16-14/04/16	15/04/16-14/07/16
Punta	0.135069	0.111059	0.093106
Resto	0.136257	0.110628	0.093190
Valle	0.131230	0.108020	0.092459

Tabla 4.16 Resumen de costo de energía tomado de pliego tarifario

Los datos de la tabla 4.16 se tomaron del pliego tarifario vigente en el período de análisis, considerando que el consume corresponde al rubro de gran demanda y la compañía distribuidora es CAESS.

Con los datos de consumo y costo de energía, se calcula el costo acumulado para todos los días que han pasado desde el último mantenimiento utilizando la ecuación 6.

4.2.4 Frecuencia de mantenimiento

Para este análisis se utilizó la ecuación 19, para obtener la frecuencia óptima de mantenimiento. A continuación se presentan una gráfica (Figura 4.14) comparativa entre frecuencias de mantenimiento comunes en la planta.

Con un valor de costo de mantenimiento de \$780.25

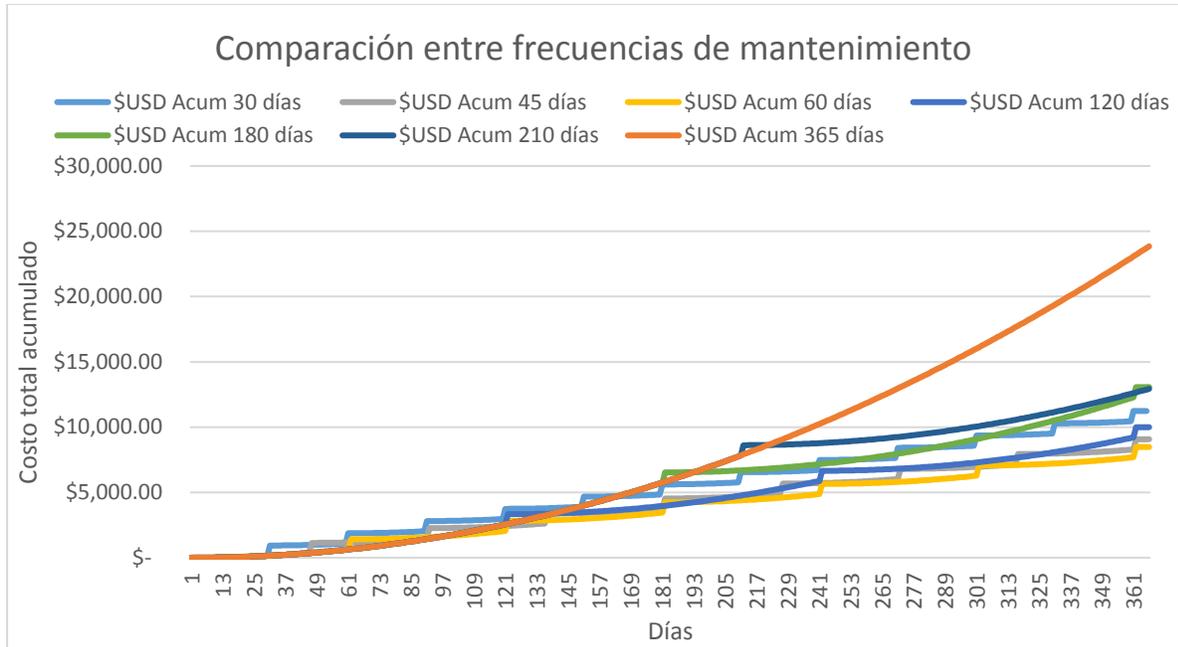


Figura 4.14 Comparación de frecuencias de mantenimiento

Como se puede observar, las distintas curvas, demuestran que para varias frecuencias existen pérdidas económicas, sea por la falta de mantenimiento o por el exceso de mantenimiento. Sustituyendo la ecuación 11 en la ecuación 19, tenemos:

$$n = \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}} = \sqrt{\frac{2C_m}{-m \cdot P \cdot E}} = \sqrt{\frac{2C_m}{-m \cdot (P_p \cdot E_p + P_r \cdot E_r + P_v \cdot E_v)}}$$

$$\sqrt{\frac{2(780.25)}{-(-0.0005306)[(0.093106)(1348.05) + (0.093190)(3504.93) + (0.092459)(1617.66]}}$$

$$= 69.91 \text{ días} \approx 70 \text{ días}$$

En este caso no podemos realizar monitoreo por condición ya que la eficiencia además de ser afectada por el paso del tiempo, es afectada también por la temperatura ambiente que es una variable sobre la cual no podemos tener control.

4.2.5 Indicadores

Los indicadores que se consideran utilizar para el control del equipo son los que se presentan en la tabla 4.17.

Nombre	Cálculo	Unidades
Temperatura ambiente	Medición de temperatura ambiente	°C
Energía consumida	Medición de consumo de energía del chiller	kWh
Capacidad de refrigeración	Medición de toneladas de refrigeración generada	TR
Energía refrigerada	Toneladas de refrigeración * 3.517	kW
COP	kW de refrigeración/kW de Energía	adimensional

Tabla 4.17 Indicadores de control de chiller

4.3 Modelo de mantenimiento basado eficiencia para un compresor.

Las especificaciones del equipo que se analizó se muestran en la tabla 4.18:

Descripción del equipo analizado	
Código de planta	Compresor 2
Potencia	75HP
Modelo	LS-16-75H
Marca	Sullair
Voltaje nominal	440V/3F
Flujo a máx. presión (cfm)	326 cfm
Presión máxima	125 psig
Eficiencia específica máxima a 125psig (kw/cfm)	0.17
Presión de trabajo del equipo	100 psig
Presión de trabajo de la línea	90 psig

Tabla 4.18 Datos del compresor

Se realizó una recopilación de datos desde el 20/02/2016 hasta el 07/08/2016, resumidos en la tabla 4.19:

Datos medidos		
Medición	Descripción	Unidades
Energía	Energía diaria consumida por hora	kWh
CFM	Pies cúbicos por minuto entregados por el equipo	CFM
DP	Diferencial de presión del separador	psig (psi)

Tabla 4.19 Mediciones realizadas al compresor

Las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 muestran los datos a analizar:

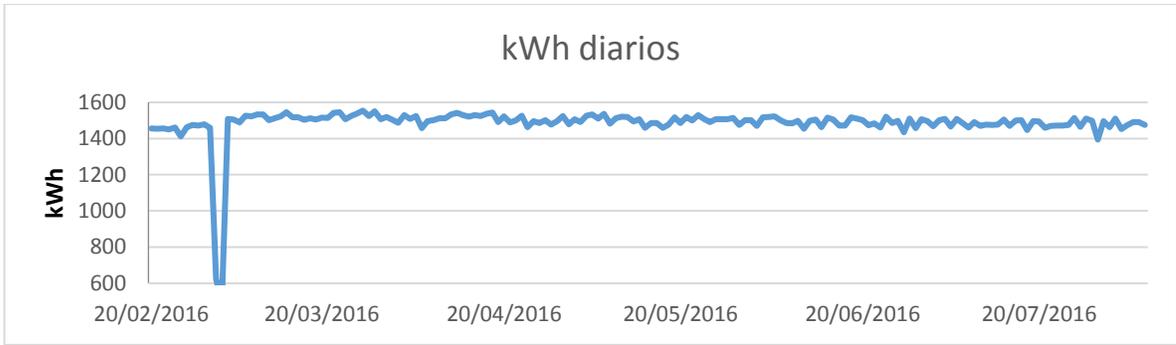


Figura 4.15 Gráfica de consumo eléctrico del compresor.

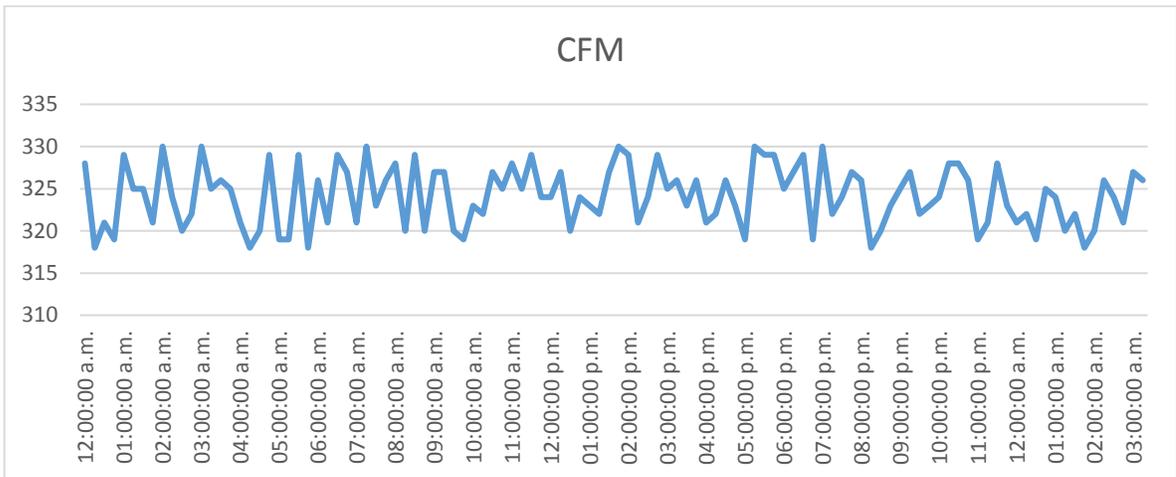


Figura 4.16 Gráfica del flujo volumétrico entregado por el compresor

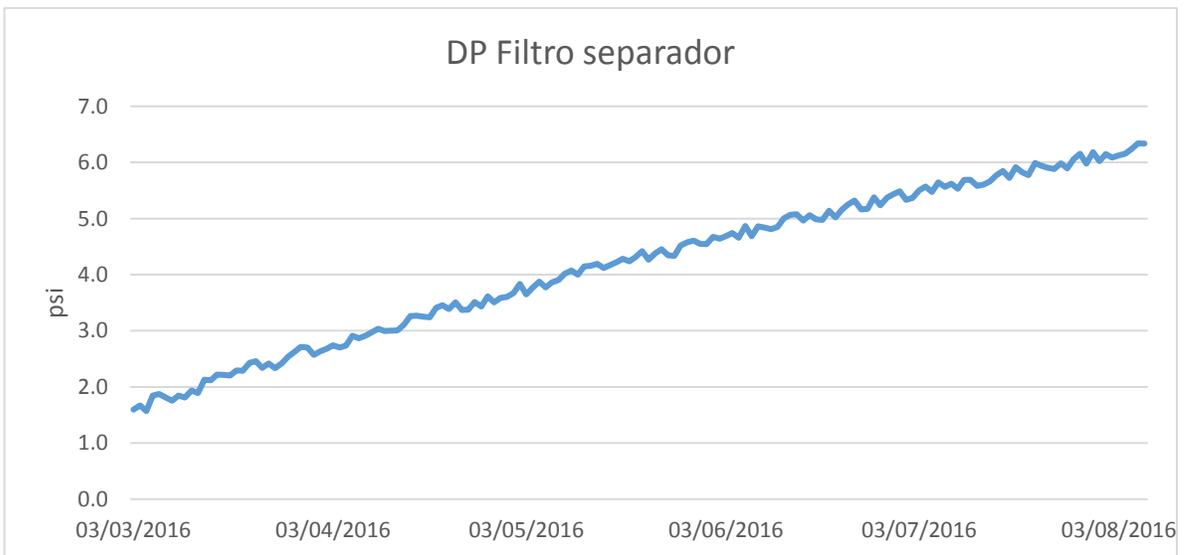


Figura 4.17 Gráfica de la presión diferencial de filtro separador.

Cabe aclarar que este compresor es parte de una red de compresores que operan para mantener una presión constante en el sistema. El compresor seleccionado permanece a plena carga el 100% del tiempo y solo es detenido mientras dura el mantenimiento.

Adicional a lo anterior, este compresor se controla con un sistema de modulación flujo de aire de entrada, por lo que al llegar a la presión de operación configurada, esta empieza a disminuir el caudal de entrada. Sin embargo para este equipo, la válvula nunca entra en operación debido a que el valor de presión configurado es mayor al presión de línea, esto asegura que el opera siempre a plena carga.

Debe considerarse el tipo de modulación del compresor y si está trabajando a plena carga o modula según demanda. Los mejores resultados para ahorro de eficiencia por mantenimiento oportuno, se reciben en los compresores base, es decir que siempre están trabajando a plena carga.

4.3.1 Mantenimiento del compresor a analizar

Los compresores constan de varios filtros, que por lo general se cambian cada 8000 horas de trabajo continuo o 1 año, según recomendaciones del fabricante. El costo de este mantenimiento para el compresor analizado se detalla en la tabla 4.20:

Ítem	Descripción	Costo
Filtro de aire	Filtro en el lado de succión de aire	\$ 150.00
Filtro separador primario	Filtro del lado de aceite	\$ 320.00
Filtro separador secundario	Filtro del lado de aceite	\$ 190.00
Kit de cambio	Incluye empaques para cambio de filtros	\$ 120.00
Aceite	25 galones de aceite para compresor	\$ 575.00
Mano de obra	2 Días de técnico especialista más mecánico	\$ 112.00
	TOTAL=	\$ 1,467.00

Tabla 4.20 Detalle del mantenimiento del compresor

Actualmente este mantenimiento se realiza en la empresa cada año calendario o cuando la caída de presión PD alcanza 10 psi.

4.3.2 Línea base del sistema

Para el compresor, se toma de línea base la inversa de la eficiencia específica según el “Instituto de aire comprimido y gas” (CAGI, por sus siglas en ingles).

Para calcular la eficiencia específica se utiliza la ecuación 23:

$$eficiencia\ específica = \frac{cfm\ entregados}{kW\ consumidos} \quad (Ec. 23)$$

Pero por facilidad de análisis, utilizaremos el rendimiento, que se calcula con el inverso de la eficiencia específica (ecuación 24).

$$rendimiento = \frac{kW\ consumidos}{cfm\ entregados} \quad (Ec. 24)$$

Según las especificaciones técnicas el equipo al operar en el rango de 90 psig, este desarrolla una eficiencia específica de 0.17 cfm/kW y un rendimiento 5.88 kW/cfm.

En la tabla 4.21 se muestran los datos antes y después de realizar el mantenimiento:

Medición antes de mantenimiento					
Fecha	Energía kWh	CFM Prom	Pot prom kW	Ef (kW/CFM)	DP
3/1/2016	1459.35	322.83	60.81	0.1884	8.8
Medición después de mantenimiento					
Fecha	Energía kWh	CFM Prom	Pot prom kW	Ef (kW/CFM)	DP
3/4/2016	1508.23	370.07	62.84	0.1698	1.7

Tabla 4.21 Datos antes y después de mantenimiento de compresor

Se observa que tras realizar el mantenimiento se logra una eficiencia ligeramente mayor que la que indican las tablas del fabricante, sin embargo, esta se pierde al poco tiempo.

En la figura 4.18 se muestran los datos de rendimiento del compresor.

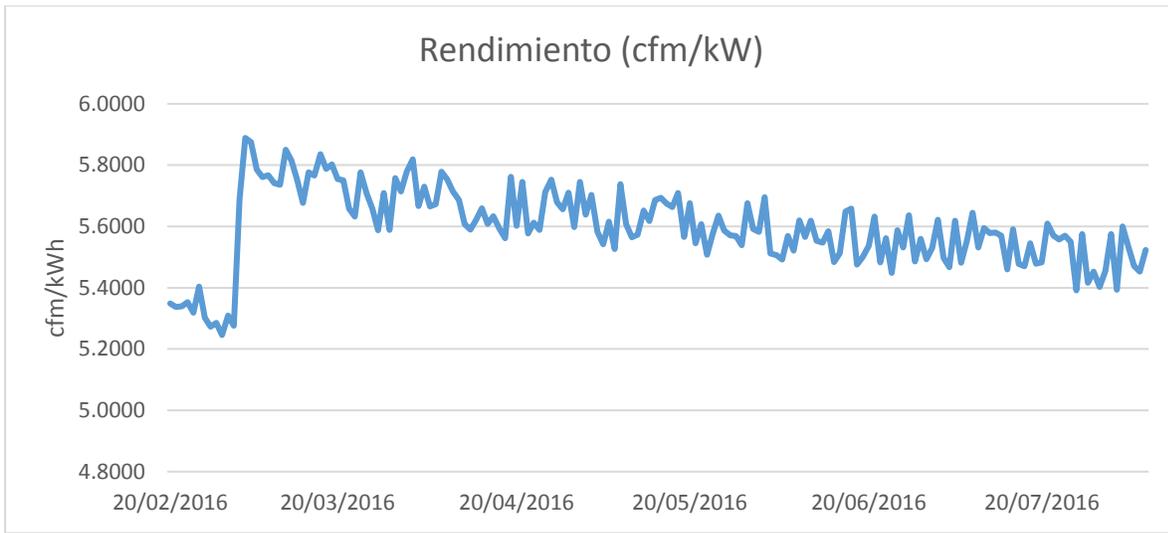


Figura 4.18 Gráfica de rendimiento del compresor

4.3.3 Modelo de predicción de pérdida de eficiencia

Para el caso del compresor, se utilizará el rendimiento para predecir la pérdida de eficiencia total del sistema. Por lo que se aplica una regresión lineal a los datos de rendimiento, la gráfica se muestra en la figura 4.19.

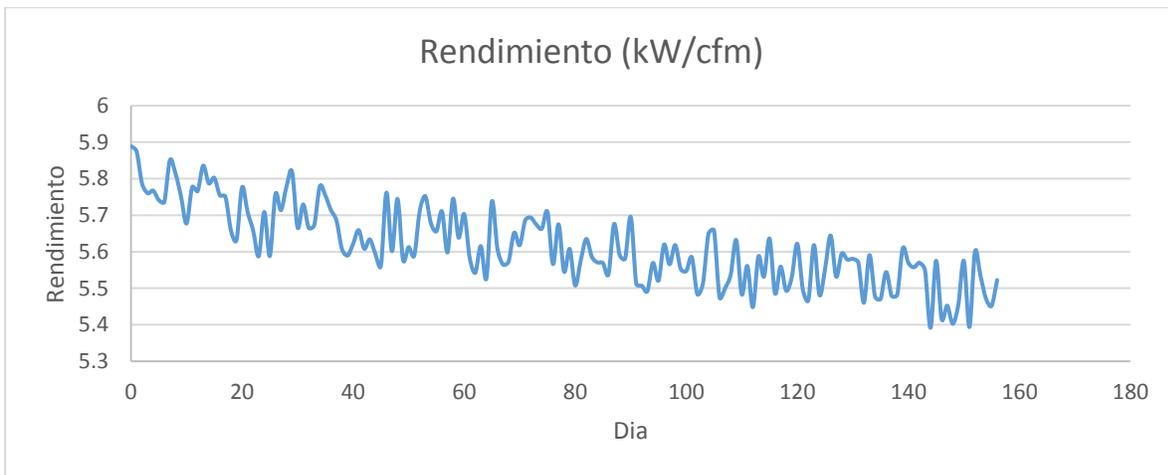


Figura 4.19 Gráfica de pérdida de eficiencia del compresor representada en el rendimiento.

Tras aplicar la regresión lineal, obtenemos los datos mostrados en la figura 4.20.

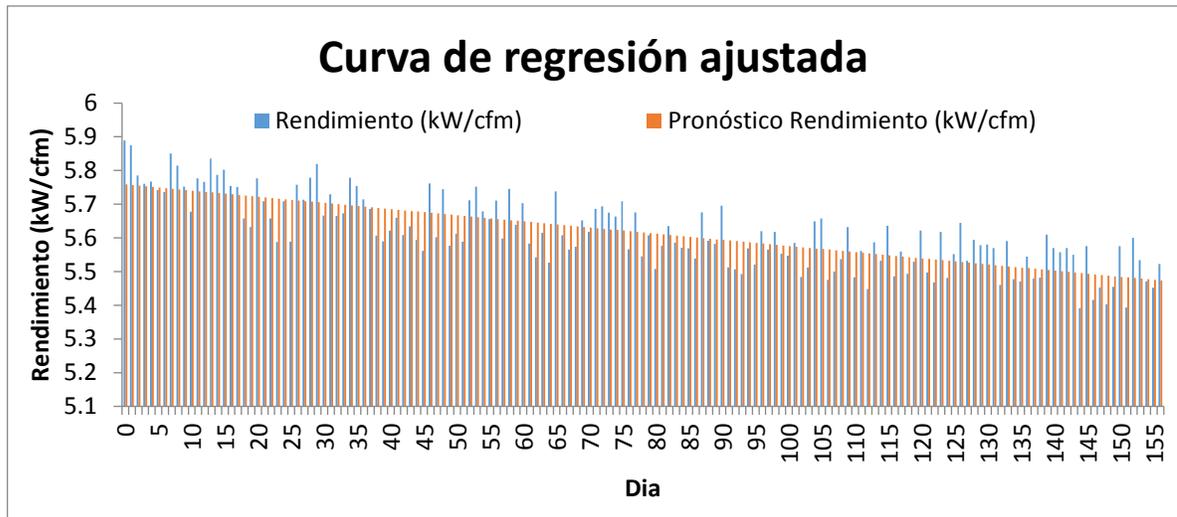


Figura 4.20 Curva de regresión ajustada

Los datos de la regresión lineal son los siguientes:

$$m = -0.00182744; b = 5.7584$$

Utilizando las ecuaciones 1, 2 y 3, y los datos de la regresión lineal, se describe una aproximación al modelo de pérdida de rendimiento.

$$r = m_r \cdot k + b_r = 5.7584 - k(0.00182744)$$

Donde:

r = Es el rendimiento (Constante)

m_r = La pendiente obtenida de la regresión lineal (Constante)

b_r = El intercepto de la regresión lineal (Constante)

k = Es el día (Variable)

Para poder utilizar las ecuaciones de optimización deducidas para este modelo, se utilizará la ecuación 25, que hace la conversión del rendimiento a la pendiente de pérdida de eficiencia.

$$m_e = \frac{m_r}{b_r(b_r + m_r)} \quad (\text{Ec. 25})$$

Como constante de costo se utiliza la ecuación 12.

$$K_c = -m_e \cdot P_E \cdot \varphi_A$$

Donde:

K_c = Es la constante de costo económico del modelo (Constante)

m_e = La pendiente de pérdida de eficiencia del modelo (Constante)

P_E = Promedio del costo de la energía \$/kWh

φ_A = Es el promedio del flujo demandado al equipo (Constante)

Finalmente, se construyen los datos del modelo, la figura 4.21 muestra la gráfica del modelo.

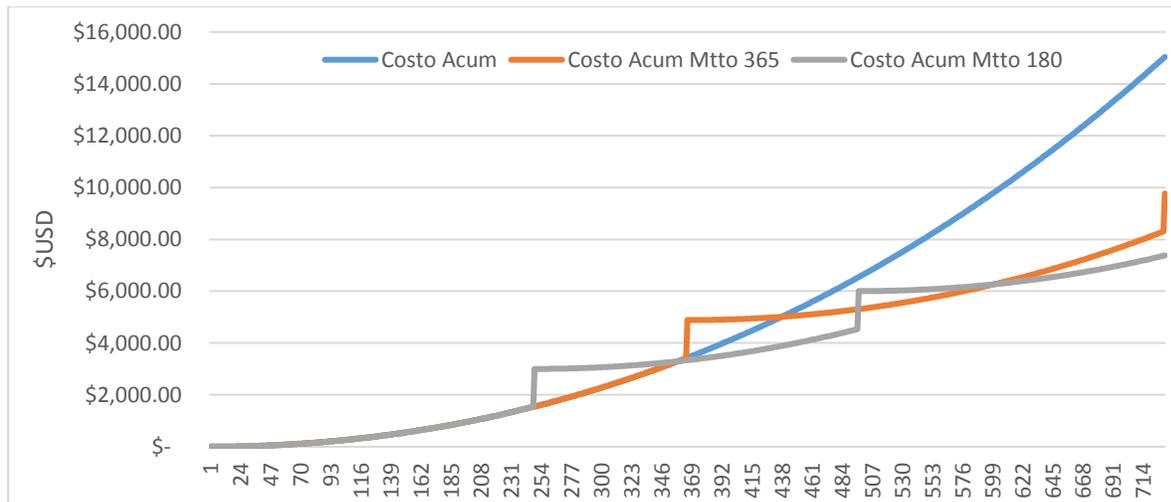


Figura 4.21 Gráfica de comparación de frecuencia de mantenimiento

4.3.4 Frecuencia de mantenimiento

Con el modelo construido, se busca encontrar la frecuencia óptima de mantenimiento, la cual puede encontrarse con la ecuación 19. Aplicando la ecuación al modelo del compresor, obtenemos:

$$n = \sqrt{\frac{2C_m}{K_c}} = \sqrt{\frac{2C_m}{-m_e \cdot P_E \cdot \varphi_A}} = \sqrt{\frac{2C_m}{-m \cdot (P_p \cdot E_p + P_r \cdot E_r + P_v \cdot E_v)}}$$

Datos del modelo			
Cantidad	Descripción	Valor	Unidad
C_m	Costo de mantenimiento	\$ 1,467.00	\$USD
m_e	Pendiente de pérdida de eficiencia	-5.51274E-05	cfm/kWh
φ_A	Consumo promedio demandados	345.00	Kw/Cfmh

Tabla 4.22 Datos para el cálculo de frecuencia óptima de mantenimiento

- Consumo diario promedio de energía por hora: 345 kW
 - Consumo Punta: 345 kW x 5h = 1725 kWh
 - Consumo Resto: 345 kW x 13h = 4485 kWh
 - Consumo Valle: 345 kW x 6h = 2070 kWh

Evaluando la ecuación con los datos de la tabla 4.16 y 4.22, se obtiene el resultado de la ecuación:

$$\sqrt{\frac{2(1467)}{-(-0.000051274)[(0.093106)(1725) + (0.093190)(4485) + (0.092459)(2070]}}$$

$$= 272.61 \text{ días} \approx 273 \text{ días}$$

Finalizando con la optimización del periodo de mantenimiento, se encontró para que este sistema, el periodo óptimo es 273 días y con esto se puede lograr un ahorro según el modelo de \$1,548.00 al año, solamente para por cambiar el periodo de mantenimiento.

4.3.5 Monitoreo de condición

Para los sistemas de compresores, lo más común es utilizar el diferencial de presión del separador, como indicador para mantenimiento, para ello, en la figura 4.22, se muestra el incremento del diferencial de presión DP desde el mantenimiento.

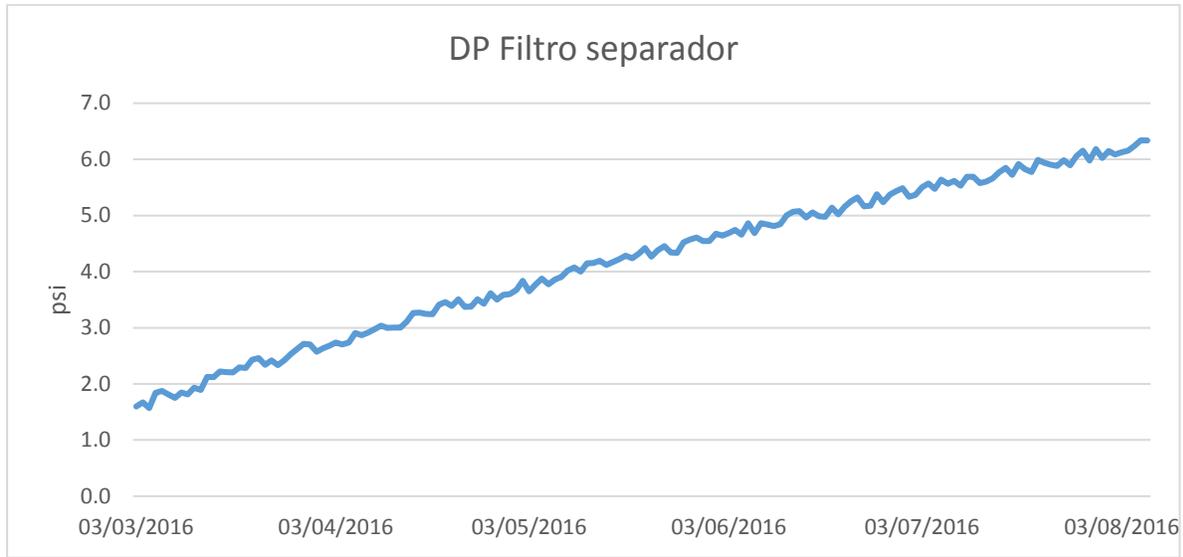


Figura 4.22 Comportamiento del diferencial de presión después del mantenimiento

Al observar el comportamiento, se ajusta mejor a un modelo exponencial que a uno lineal. Por lo que se utiliza la técnica de regresión por suma de mínimos cuadrados utilizando el complemento Solver de Excel.

La ecuación 26 es la que mejor se ajusta al comportamiento que se observa en los datos.

$$DP = A \left(1 - e^{\frac{k}{T}} \right) \quad (Ec. 26)$$

Los resultados del procedimiento se presentan en la tabla 4.23.

Resultados	
Error	30
T	-61.2
A	6.31

Tabla 4.23 Valores de las variables resultantes del análisis estadístico

Sustituyendo en la ecuación 26 obtenemos el comportamiento de DP en el tiempo para cualquier día.

$$DP = 6.31(1 - e^{-\frac{k}{61.2}})$$

Aplicando la regresión se obtiene la ecuación 26, que describe el incremento del DP en el tiempo. Finalmente, al evaluar el periodo óptimo de mantenimiento obtenemos:

$$DP = 6.31 \left(1 - e^{-\frac{248.6}{61.2}}\right) = 6.2 \text{ psi}$$

Por lo que en un modelo de mantenimiento basado en condición, puede usarse el valor de 6.2 psi de diferencial de presión del separador, para programar mantenimientos.

4.3.6 Indicadores recomendados para el modelo

Para el sistema de compresores, se propone la tabla 4.24 de indicadores para aplicar el modelo y programar mantenimientos, así como ver cambios importantes del sistema.

Nombre	Descripción	Frecuencia recomendada	Cálculo	Comparar con variable del modelo
DP	Diferencial de presión en el separador	Diario	Tomar de manómetro	DP
PE	Costo promedio del kWh	Mensual	$P_E = \frac{\sum_{i=1}^k \text{Precio por kWh}}{k}$	P_E
FA	CFM promedio entregado	Diario	$\varphi_A = \frac{\sum_{i=1}^k \text{Consumo diario}}{k}$	φ_A
Cm	Costo del mantenimiento	Anual	Ver Tabla 4.19	C_m
r	Rendimiento promedio	Semanal	$r = \frac{\text{potencia máxima}}{\text{cfm máximo}}$	r

Tabla 4.24 Indicadores de control para compresor

4.4 Modelo de mantenimiento para tanques de calentamiento.

Las especificaciones de los equipos que se analizaron se muestran en la tabla 4.25:

Especificaciones de los tanques	
Potencia de resistencias	8.4 kW
Voltaje nominal	220V/1F
Consumo de energía nominal diario	161.7 kWh
Temperatura de trabajo	85 Celsius
Cantidad de tanques	102 Unidades

Tabla 4.25 Datos de los tanques de calentamiento

Los tanques contienen agua, en la que se procesa el material y estos equipos deben de mantener el agua a una temperatura constante de 85 Celsius, para ello utilizan resistencias que operan de manera intermitente. La figura 4.23 muestra el ciclo de trabajo normal de los tanques.

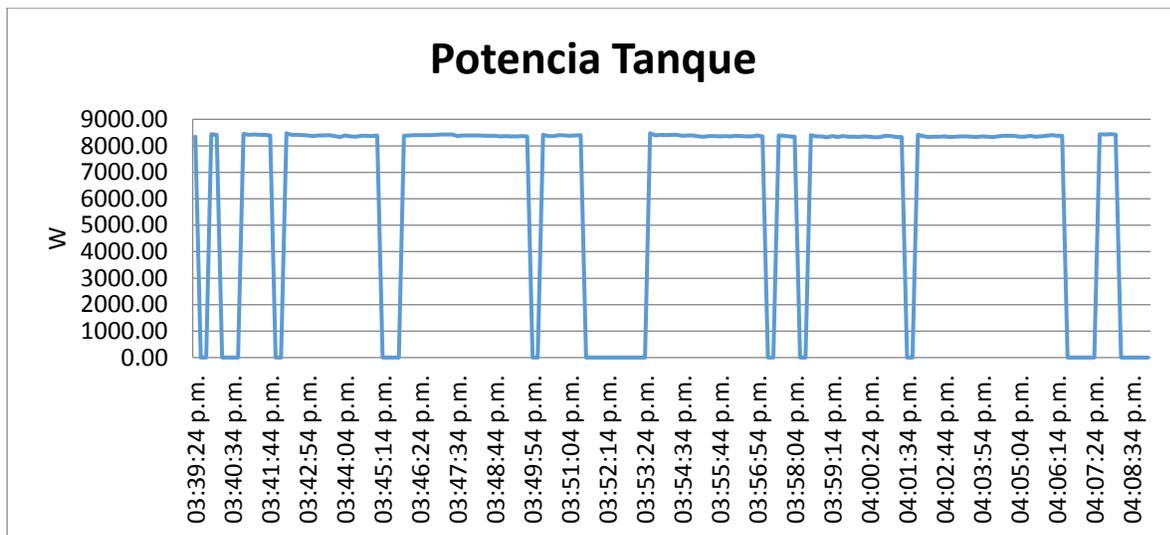


Figura 4.23 Ciclo de trabajo de las resistencias del tanque

Cuando el tanque opera normalmente, este consume diario 161.7 kWh por día. El sistema de calentamiento basado en resistencias, consta de un controlador de temperatura, como los que se muestran en la figura 4.24, obtiene una lectura de temperatura por medio de una PT100, que se encuentra sumergida en el agua.



Figura 4.24 Controles de temperatura de tanques

Debido al alto número de conmutaciones, se utilizan relés de estado sólido (ver figura 4.25), que pueden operar a mayor velocidad y no tienen partes móviles.

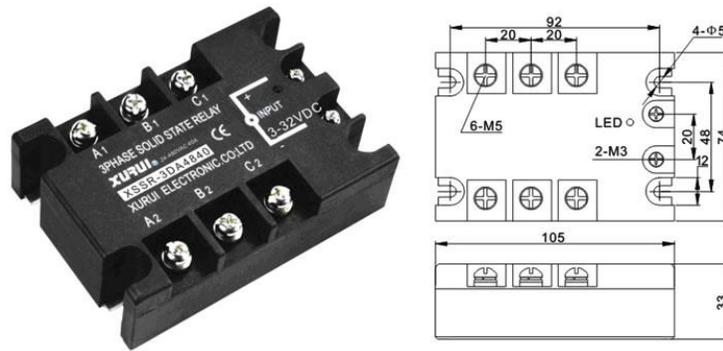


Figura 4.25 Relé de estado sólido

Un esquema simplificado del sistema se presenta en la figura 4.26.

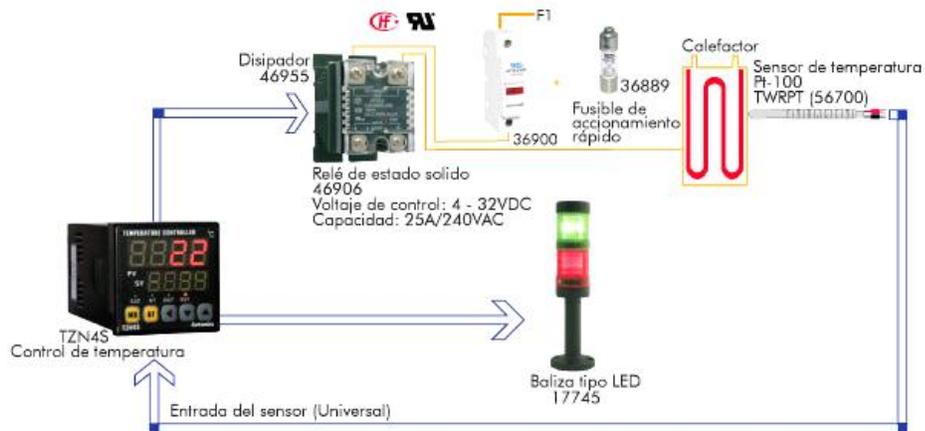


Figura 4.26 Diagrama de funcionamiento del sistema de calentamiento

4.4.1 Modo de falla

Las fallas más comunes que presenta el tanque se detallan en la tabla 4.26.

Elemento	Modo de falla	Efecto	Detectable	Fallas por año
Control de temperatura	Salida no conmuta	No logra alcanzar la temperatura	Si	1
	Pérdida de calibración	Temperatura errada	No	1
Relé de estado sólido	Permanentemente cerrado	Incrementa consumo eléctrico	No	1.5
	Permanentemente abierto	No logra alcanzar la temperatura	Si	1

Tabla 4.26 Análisis de modo de falla y efecto

La falla que se analizó es, cuando el relé queda permanentemente cerrado, lo que aumenta el consumo eléctrico de 161.7 kWh a 201.6 kWh por día. Esta falla no es detectable, debido a que el proceso tiene un sistema de enfriamiento con agua, que va a una torre de enfriamiento. Por lo que la energía es desperdiciada.

La falla por lo general se detecta hasta que toca revisión del equipo cada aproximadamente 60 días. Se realizó una recopilación de datos de mantenimientos por esta falla desde Enero 2015 hasta el Agosto 2016, las cuales son 79 mantenimientos hechos a 68 de los 102 tanques.

4.4.2 Análisis de supervivencia

Para estimar la pérdida por fallas no detectables, se utiliza la distribución de Weibull, debido a que se busca la probabilidad de que la falla ocurra en el tiempo antes de las revisiones.

En la figura 4.27, se puede observar la regresión lineal de los datos para construir la curva de distribución.

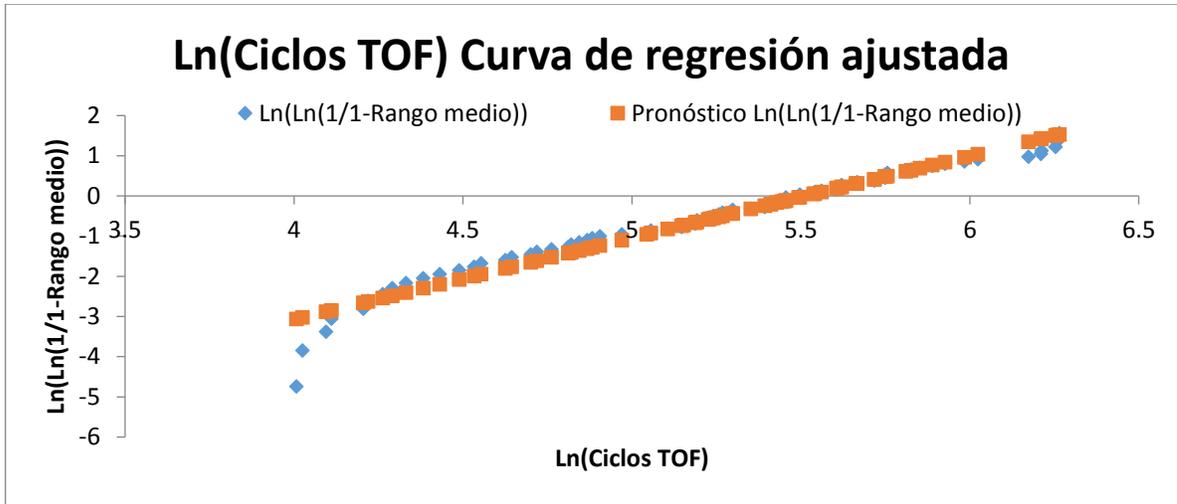


Figura 4.27 Gráfica de regresión ajustada para ciclos TOF

De la regresión, se encuentran los valores alfa y beta, que se presentan en la tabla 4.27.

Alfa	247.77
Beta	2.032

Tabla 4.27 Valores de variables de distribución de Weibull

Por lo que la ecuación de la distribución de Weibull para estos equipos, queda expresada en la ecuación 27.

$$P_S = e^{-\left(\frac{k}{\alpha}\right)^\beta} = e^{-\left(\frac{k}{247.7}\right)^{2.032}} \quad (Ec. 27)$$

La figura 4.28, es la representación gráfica de la distribución para esta falla.

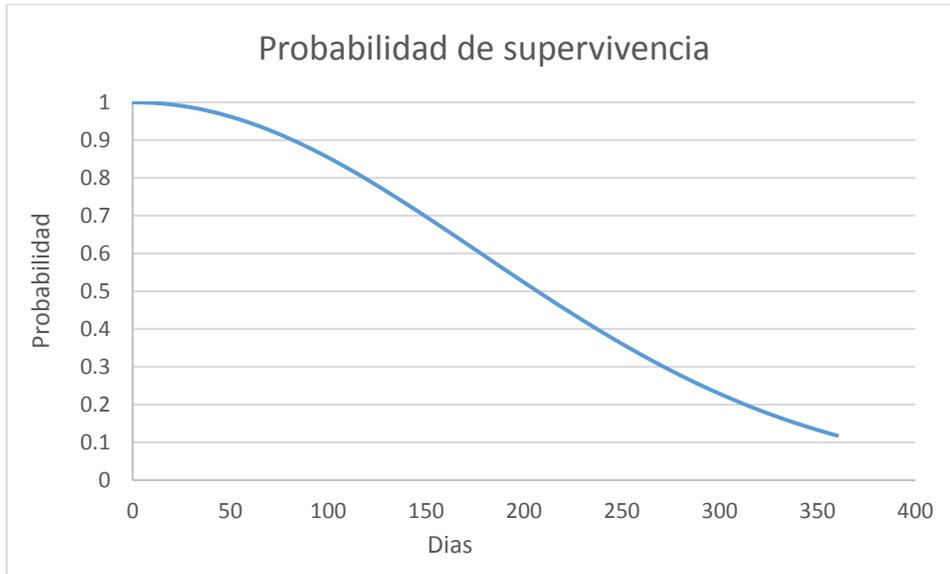


Figura 4.28 Curva de probabilidad de supervivencia

4.4.3 Análisis de costo

Para realizar el análisis de costo se utiliza una tabla que simula una corrida de revisiones para un tiempo específico, para este caso se analiza un periodo total de 365 días y con una frecuencia de revisión de 60 días. La tabla 4.28, muestra el ejemplo de encabezados con sus fórmulas y la tabla 4.29, es el ejemplo de la aplicación.

Día	Supervivencia	Probabilidad de falla	Máquinas falladas	Máquinas reparadas	Energía diaria por máquina	Energía acumulada	Costo acumulado
k	$P_S = e^{-\left(\frac{k}{\alpha}\right)^\beta}$	$P_F = 1 - P_S$	$M_F = P_F \cdot M$ Solo enteros	$M_R = P_F \cdot M$ Desde la última revisión	$E = (M_F - M_R)E_M$	$E_T = \sum_{n=1}^k E[n]$	$C_A = E_T \cdot P_E$

Tabla 4.28 Tabla de simulación de revisiones para análisis de costo

Día	Supervivencia	Probabilidad de falla	Máquinas falladas	Máquinas reparadas	Energía diaria por máquina	Energía acumulada	Costo acumulado
57	0.950	0.049	5	0	200	2993	\$ 12,417.68
58	0.949	0.050	5	0	200	3192	\$ 13,245.52
59	0.947	0.052	5	0	200	3392	\$ 14,073.37
60	0.945	0.054	5	5	0	3392	\$ 14,073.37
61	0.943	0.056	5	5	0	3392	\$ 14,073.37
62	0.941	0.058	5	5	0	3392	\$ 14,073.37
63	0.940	0.059	6	5	40	3431	\$ 14,238.94
64	0.938	0.061	6	5	40	3471	\$ 14,404.51
65	0.936	0.063	6	5	40	3511	\$ 14,570.08
66	0.934	0.065	6	5	40	3551	\$ 14,735.64

Tabla 4.29 Ejemplo de análisis de costo por simulación de revisiones

Los resultados se muestran en la tabla 4.30.

Máquinas	102	Unidades	M
Pérdida de energía diaria	39.9	kWh/día	E_M
Precio por kWh	0.104	\$/kWh	P_E
Frecuencia de revisión	60	días	
Acumulado 365 días	\$ 430,313.93	\$/USD	C_A

Tabla 4.30 Resultados de simulación y análisis de costo

4.4.4 Tipo de mantenimiento recomendado

Debido al alto costo anual por pérdida de eficiencia, lo mejor es instalar un monitoreo constante, que indique cuando se ha presentado la falla. El sistema propuesto consta de un relé de retardo a la conexión redisparable con un sistema de luz piloto. El costo de este sistema se detalla en la tabla 4.31 y se presenta el esquema en la figura 4.29

Ítem	Costo
Relé de tiempo marca siemens	\$ 62.50
Luz piloto rojo 120VAC	\$ 23.00
Cableado e instalación	\$ 48.00
TOTAL=	\$ 133.50

Tabla 4.31 Detalle de inversión de sistema propuesto



Figura 4.29 Diagrama de conexión para modificación de monitoreo

Para las 102 máquinas se invertiría \$13,617.00 USD que se pagarían en menos de un año en ahorro por energía eléctrica.

4.5 Resumen de resultados

Tras realizar los análisis de los 4 casos seleccionados, se comprobó que efectivamente los sistemas analizados pueden ser optimizados económicamente, mejorando la eficiencia de su operación, aumentando la frecuencia de mantenimiento.

Las pérdidas de eficiencia aunque, a primera vista no parecen ser apreciables, o se consideren como normales durante mantenimientos, estos logran acumular una gran cantidad de costo asociado al consumo de energía.

Utilizando el modelo de mantenimiento centrado en eficiencia, la programación del mantenimiento evaluando el costo por pérdida de eficiencia, no solo demuestra que es económicamente viable que se incremente la frecuencia de mantenimientos, mejorando de esta manera el desempeño global del equipo, además de que los mantenimientos se pagan con el retorno económico en consumo de energía.

Al compararlo con otros modelos de mantenimiento, que se enfocan en que el equipo no llegue a un punto de falla, como el mantenimiento centrado en confiabilidad o técnicas predictivas de fallas, el modelo propuesto, no solo propone hacerlo antes del tiempo de falla sino que reduce costos aumentando mantenimientos.

Para el caso de una gran cantidad de equipos, cuya falla se traduzca en pérdida de eficiencia, es efectivo analizar la probabilidad de fallas y el costo asociado acumulado hasta cada mantenimiento periódico, utilizando el método de esperanza de vida o supervivencia de Weibull. Este método logra dar una curva de probabilidad de máquinas falladas a través del tiempo que permite hacer análisis y predecir costos aproximados en un periodo de tiempo.

La tabla 4.32 muestra un ejemplo comparativo de distintos modelos de mantenimiento.

	Mantenimiento proactivo	Mantenimiento productivo	Mantenimiento productivo total	Mantenimiento centrado en la confiabilidad	Mantenimiento centrado en eficiencia
Reducción de costos	Reduce costos mejorando el ciclo de vida del sistema	Reduce el costo de los problemas periodicos	Mejora la eficiencia global del equipo y resuelve totalmente los problemas del equipo	Optimiza el intervalo del mantenimiento previniendo fallas	Reduce costos por pérdida de eficiencia en los equipos.
Productividad del equipo	Selecciona técnicas de mantenimiento comprobado, correctivo y preventivo identificando el proceso de mantenimiento	Reduce paros de mantenimiento de equipo y calendariza tareas de mantenimiento para disminuir fallas	Incrementa el índice de operación y reduce los paros del equipo.	Incrementa la fiabilidad del equipo	Incrementa la producción de equipos, mejorando la eficiencia promedio de los equipos.
Mejora continua	No considera mejoras continuas.	Monitoreo de fallas, vigilancia periódica, teconología de análisis de fallas.	Alcanza mejoras continuas, utilizando estandarización extensiva y organización del área de trabajo.	Emplea métodos predictivos de fallas para lograr la mejora continua.	Emplea métodos predictivos en indicadores de eficiencia de equipos para mejora continua.

Tabla 4.32 Tabla comparativa entre modelos de mantenimiento comunes y el modelo centrado en eficiencia

Al igual que cada modelo de mantenimiento, el modelo de mantenimiento centrado en eficiencia, no pretende dar una solución única para todos los sistemas, sino que está orientado para los equipos de que clasifiquen como USE (Usuarios significativos de energía), puedan analizarse bajo esta perspectiva y mejorar su rendimiento con mantenimientos más frecuentes.

Las consideraciones finales en la implementación del modelo, son:

1. Preferiblemente los equipos deben tener respaldo para facilitar los tiempos de mantenimiento.
2. Los centros de costo deben ser flexibles para poder retornar el ahorro en consumo de energía y poder pagar el incremento de mantenimientos
3. Los mantenimientos que se analicen para los equipos, deben de demostrar una mejora en la eficiencia del equipo, tal que pueda retornar su costo en el tiempo.
4. El modelo es mejor utilizado en combinación con otros modelos tales como el TPM y RCM, para el resto de equipos que no puedan aplicar como candidatos para la implementación del momento.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del estudio realizado, se presentan las siguientes conclusiones:

1. Es posible programar mantenimientos a equipos, que maximicen la eficiencia y que estos, produzcan un retorno económico en consumo energético, aunque se incremente la frecuencia de mantenimiento.
2. Crear indicadores, que consideren la eficiencia de las máquinas como, monitoreo de condición para mantenimiento, produce resultados económicos.
3. Considerar la pérdida de eficiencia como, pérdida de función de una máquina, puede mejorar la rentabilidad de la operación.
4. Los factores como el costo de mantenimiento, el costo unitario de la energía, el consumo promedio del equipo y la velocidad de decrecimiento de la eficiencia, son los principales agentes del costo de operación del equipo a considerar para la programación de mantenimientos si el objetivo es optimizar la eficiencia de los equipos.
5. Mejorar costos de mantenimiento, puede de manera indirecta mejorar las eficiencias de los equipos, debido a que permite mejores intervalos de mantenimiento.
6. Deben considerarse grupos grandes de equipos idénticos y evaluar si el conjunto califica como USE, debido a que fallas recurrentes puedan significar pérdidas económicas fuertes.

Finalmente, para la reproducción del modelo, mejora o implementación; se recomiendan los siguientes puntos:

1. Definir la línea base y los indicadores de eficiencia de los equipos a analizar, es el punto más importante a tener en cuenta para la implementación del modelo.
2. Relacionar indicadores de operación y mantenimiento, con indicadores de eficiencia, es una de las mejores
3. Es recomendable llevar historial del punto de eficiencia lograda tras cada mantenimiento, debido a que con el tiempo posiblemente, los mantenimientos no logren los mismos puntos de eficiencia, esto debe considerarse en la evaluación de obsolescencia de los equipos.
4. De encontrarse sistemas que no sean lineales en la pérdida de eficiencia, y una aproximación lineal o técnicas de linealización, no sean factibles, deberán utilizarse las ecuaciones iniciales (Ecuaciones 4, 5, 6 y 7 de la metodología) para encontrar las nuevas ecuaciones, que describan la pérdida económica y de eficiencia en el tiempo.

REFERENCIAS

- AGUSTIADY, T., CUDNEY, E. (2016). *Total Productive Maintenance: Strategies and Implementation Guide*. EE.UU.
- AMENDOLA, L. (2010). *Eficiencia Energética en Mantenimiento de Activos “Una Visión de Negocio”*. España.
- BARRIOS, J. (2009). *Modelo de gestión de mantenimiento centrado en el uso eficiente de la energía en la planta LAMITECH S.A.* Colombia.
- BELEÑO, E., ANGARITA, S. y GONZALEZ, J. (2014). *Mantenimiento Centrado en la eficiencia*. Colombia
- CAMPOS, J. (2008). *Mantenimiento centrado en la eficiencia energética. Nueva gestión organizacional para reducir costos de mantenimiento y energía*. Colombia.
- CIED – PDVSA. (1999). *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. Venezuela.
- MOUBRAY, J. (1997). *Reliability-centered Maintenance*. EE.UU.
- ORREGO, J. (2013). Estrategia de Mantenimiento hacia un verdadero URE. *Mantenimiento en Latinoamérica (Colombia)*, Vol.5, N°4, 26-27.
- WIREMAN, T. (2007). *World class maintenance management*. EE.UU.
- ASME (2011). *ASME PTC-4 – Indirect Method: Stack Loss Method*. EE.UU.

Fuentes Electrónicas

- <http://www.gestiopolis.com/medicion-gestion-mantenimiento-empresa/> (Consulta: 05/05/2016).
- https://www.udc.es/archivos/sites/udc/galeria_down/sociedade/medio_ambiente/enerxia/congresoMantementoSostenible.pdf (Consulta: 07/05/2016).
- <http://documents.mx/documents/manual-mtmtto-centrado-eficiencia-final.html> (Consulta: 10/05/2016).
- <http://www.andi.com.co/SeccAtla/Documents/Informacion%20de%20Interes/Memorias%20de%20Reuniones/OPORTUNIDADES%20DE%20LA%20GESTI%C3%93N%20ENERG%C3%89TICA%20.pdf> (Consulta: 14/05/2016).