

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electromecánica

Proyecto de Práctica Profesional



Zollner Costa Rica Ltda

“Desarrollo de la estructura necesaria para la implementación del modelo de mantenimiento basado en Prognostics and Health Management (PHM) para el área de facilidades de la empresa Zollner Electronics Costa Rica Ltda”

Informe de Práctica de Especialidad para optar por el título Ingeniero en Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura

José Alejandro González Quirós

Cartago, Costa Rica

Profesor Guía:

Ing. Carlos Piedra Santamaría

Asesor Industrial:

Ing. Luis Bonilla Abarca

Tribunal Examinador:

Juan Pablo Arias Cartín

Rodolfo Elizondo Hernández

Información del estudiante y la empresa

Nombre: José Alejandro González Quirós
Cédula: 3-0481-0509
Carné TEC: 201236025
Dirección de residencia en época lectiva: De McDonald's Metrocentro Cartago 100 metros sur y 50 al este, frente al restaurante el Excelente
Dirección de residencia en época no lectiva: De McDonald's Metrocentro Cartago 100 metros sur y 50 al este, frente al restaurante el Excelente
Teléfono en época lectiva 8345-8807
Teléfono en época no lectiva 8345-8807
Email: josealegon@gmail.com
Fax: NA

Información del Proyecto

Nombre del Proyecto: "Desarrollo de la estructura necesaria para la implementación del modelo de mantenimiento basado en Prognostics and Health Management (PHM) para el área de facilidades de la empresa Zollner Electronics Ltda"

Profesor Asesor: Carlos Piedra Santamaría
Asesor Industrial: Luis Bonilla Abarca
Horario de trabajo del estudiante: Lunes a Viernes de 8 am a 4 pm

Información de la Empresa

Nombre: Zollner Electronics Costa Rica Ltda
Zona: Parque Industrial La Lima, Cartago, Costa Rica
Dirección: 300 metros oeste del Almacén Fiscal del Banco Crédito Agrícola de Cartago
Teléfono: 2550-5700
Fax: NA
Apartado: 30102
Actividad Principal: Manufactura y diseño de tarjetas electrónica para industria médica y automotriz

Contenido

Resumen	16
Palabras claves.....	16
Abstract	17
Key words	17
Capítulo 1 Introducción.....	18
1.1 Generalidades de la empresa.....	18
1.1.1 Reseña Histórica	18
1.1.2 Organigrama Zollner Costa Rica	19
1.1.3 Misión	21
1.1.4 Visión.....	21
1.1.5 Política Ambiental.....	21
1.1.6 Política de Calidad	21
1.1.7 Ubicación Geográfica	22
1.2 Descripción del Proceso Productivo	22
1.3 Descripción del Proyecto	26
1.4 Objetivos del Proyecto	26
1.4.1 Objetivo General	26
1.4.2 Objetivos Específicos	26
1.5 Descripción del Proyecto	26
1.6 Metodología	29
1.7 Cronograma.....	30

1.8	Alcance del proyecto.....	32
1.9	Limitaciones del proyecto	32
1.10	Impacto del proyecto a la sociedad.....	33
1.11	Impacto del proyecto al medio ambiente	34
2	Capítulo 2: Marco Teórico	35
2.1	Historia de Mantenimiento	35
2.2	Tipos de Mantenimiento.....	38
2.2.1	Correctivo	38
2.2.2	Preventivo	38
2.2.3	Predictivo.....	39
2.2.4	Mantenimiento Propio (self-maintenance).....	39
2.3	Modelo de PHM	41
2.3.2	Diagnóstico.....	43
2.3.3	Pronóstico	44
2.3.4	RUL (Remaining Useful Life).....	46
2.3.5	Pasos recomendados para aplicar el método de PHM	48
2.3.6	Beneficios.....	49
2.4	Criticidad de equipos	51
2.5	Indicadores de Mantenimiento	54
2.5.1	Tiempo medio entre fallas (TMEF)	55
2.5.2	Tiempo medio de reparación (MTTR)	56
2.5.3	Disponibilidad.....	58
2.5.4	Confiabilidad.....	58

2.6	Modelos probabilísticos en confiabilidad para mantenimiento	59
2.6.1	Tipos de modelos de análisis de confiabilidad	60
3	Capítulo 3: Estado actual del mantenimiento del Departamento de Facilidades	67
3.1	Historiales de mantenimiento.....	67
3.1.1	Correctivo	68
3.2	Estado actual del mantenimiento en la empresa	68
3.2.1	Preventivo	69
3.2.2	Predictivo.....	70
3.2.3	Paros inesperado	70
3.3	Codificación	71
3.4	Equipo de Facilidades.....	71
3.5	Equipo Crítico	75
3.6	Historial del mantenimiento realizado en los equipos críticos.....	79
3.6.1	Historial del mantenimiento del compresor de tornillo Ingersoll Rand de 60 hp	79
3.6.2	Historial de mantenimiento de las bombas de vacío	83
3.7	Índices de mantenimiento	85
4	Propuesta del modelo PHM en los equipos críticos de facilidades	92
4.1	Propuesta de Diagnóstico.....	93
4.1.1	Propuesta de plan de mantenimiento predictivo.....	93
4.1.2	Diagrama de flujo para acciones predictivas	94
4.1.3	Fichas técnicas de los equipos críticos	97
4.1.4	Variables a monitorear en equipo crítico	98

4.1.5	Costo de mantenimiento predictivo contratado	101
4.1.6	Costo de mantenimiento predictivo usando sensores y monitoreo en línea 101	
4.1.7	Propuesta de Self-Maintenance (mantenimiento propio)	102
4.1.8	Conexión al Datalogger Delphin.....	109
4.1.9	Programación de los sensores en el datalogger Delphin	112
4.1.10	Recolección y análisis de datos	115
4.2	Propuesta de Pronóstico.....	124
4.2.1	Modelo Probabilístico Propuesto.....	124
4.2.2	Rutinas de mantenimiento basado en la condición del equipo.....	125
4.3	Análisis económico del proyecto.....	127
5	Bibliografía	129
6	Conclusiones.....	132
7	Recomendaciones.....	133
8	Apéndices.....	134
8.1	Programación del arduino.....	134
8.1.1	Costo del dispositivo del Arduino	136
8.1.2	Fotos de la colocación del Arduino y del sensor	137
8.2	Fichas técnicas	138
9	Anexos	140
9.1	Costos de mantenimiento del compresor.....	140
9.2	Análisis de aceite	141
9.3	Cotización de Termogram.....	143

9.4	Cotización de la compañía Delphin.....	144
9.5	Correo sobre sensores del compresor.....	148

Índices de Figuras

Figura 1.1. Diferentes sedes a nivel mundial de la empresa Zollner Costa Rica..	19
Figura 1.2 Organigrama Empresa Zollner Costa Rica.....	20
Figura 1.3 Ubicación Geográfica Zollner Electronics Costa Rica	22
Figura 1.4 Descripción del Proceso Productivo.....	23
Figura 1.5 Diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto	31
Figura 2.1 Desarrollo del mantenimiento en la historia.....	37
Figura 2.2 Diagrama de evolución del mantenimiento.....	40
Figura 2.4 Diferentes técnicas para pronosticar la vida útil restante (RUL)	46
Figura 2.5 Pasos sugeridos para una correcta implementación de PHM	48
Figura 2.6 Datos utilizados para el modelo de Weibull.....	63
Figura 2.7 Datos para obtener la ecuación de regresión lineal	64
Figura 3.1 Estructura de codificación	71
Figura 3.2 Uso de recursos en las máquinas de producción, analizado en Febrero del 2017	77
Figura 3.3 Distribución de los costos del mantenimiento realizado al compresor	80

Figura 4.3 Modelo de PHM.....	92
Figura 4.2 Diagrama de flujo para las actividades de mantenimiento predictivo ..	94
Figura 4.2 Flujo-grama de trabajo predictivo cuando tercerizado.....	96
Figura 4.4 Ficha técnica del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp	97
Figura 4.5 Sensor de Corriente no invasivo	103
Figura 4.6 Estado de la temperatura del rodamiento.....	104
Figura 4.7 Estado del filtro de aceite y temperatura de entrada del compresor .	105
Figura 4.8 Estado del filtro de succión.....	105
Figura 4.9 Conexión de cualquier sensor que envíe voltaje y sea analógico	110
Figura 4.10 Conexión de cualquier termocopla al datalogger.....	111
Figura 4.11 Sensores que generan señales de corrientes	112
Figura 4.12 Programación del sensor de voltaje en el datalogger Delphin.....	113
Figura 4.13 Programación del sensor de temperatura	114
Figura 4.14 Adquisidor de datos marca Delphin Profi Message.....	116

Figura 4.15 Instalación del equipo de medición Fluke 1730 en el panel del compresor Ingersoll Rand	119
Figura 4.16 Gráfica de corriente según tiempo de las tres fases del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp	120
Figura 4.17 Informe de los datos medidos en el compresor de tornillo	121
Figura 4.18 Gráfico de Corriente versus Tiempo de las tres fases del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp	122
Figura 8.1 Código de Arduino para el uso de sensor de corriente y almacenamiento en SD	135
Figura 8.2 Arduino en la caja de acrílico	137
Figura 8.3 Arduino y tarjeta ethernet en la caja de acrílico.....	137
Figura 8.4 Ficha técnica del secador.....	138
Figura 8.5 Ficha técnica de la bomba 1.....	139
Figura 9.1 Costos de repuestos del mantenimiento del Compresor de 60 hp marca Ingersoll Rand para las 12 000 horas de trabajo	140
Figura 9.2 Costos totales de mantenimiento del compresor mes de febrero del 2017 (12000 horas de trabajo)	141

Figura 9.3 Análisis de aceite del compresor Ingersoll Rand 60 hp tomado en Julio del 2016	142
Figura 9.4 Cotización realizada por Termogram para acciones de mantenimiento predictivo	143
Figura 9.5 Cotización de la tarjeta de adquisidor de datos para vibraciones.....	144
Figura 9.6 Cotización de la tarjeta de adquisidor de datos para vibraciones especificación técnica	145
Figura 9.7 Cotización del dispositivo Expert Vibro.....	146
Figura 9.8 Cotización de Expert Vibro especificación técnica	147
Figura 9.9 Correo de comunicación con persona de Cummings	148

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Metodología de trabajo para el desarrollo del proyecto	29
Tabla 1.2 Pasos de la realización del proyecto	30
Tabla 2.1 Propuesta de tabla de criticidad	53
Tabla 2.2 Calificación de los criterios de evaluación	53
Tabla 2.3: Tabla guía para el cálculo del tiempo medio entre falla.....	55
Tabla 2.4: Tabla guía para el cálculo del tiempo medio entre reparación	57
Tabla 3.1 Lista de equipos del departamento de facilidades de Zollner Costa Rica	72
Tabla 3.2 Criticidad de Equipos de Facilidades.....	75
Tabla 3.3 Costo de Mantenimiento del compresor 60 hp Ingersoll Rand por año según horas de trabajo.....	81
Tabla 3.4 Costo de mantenimiento del compresor según sistema	82
Tabla 3.5 Costos del Mantenimiento Preventivo de las bombas de vacío.....	84
Tabla 3.6 Valores del índice de mantenimiento de tiempo medio entre fallas acumulado para los equipos críticos de facilidades para los meses de marzo y abril del 2017 ...	85
Tabla 3.7 Valores del índice de mantenimiento tiempo medio entre reparación para los equipos críticos de Facilidades para los meses de marzo y abril del 2017	86

Tabla 3.8 Datos obtenidos del índice de mantenimiento de disponibilidad para los equipos críticos de Facilidades.....	87
Tabla 3.9 Datos del índice de mantenimiento de confiabilidad estadística para los meses de marzo y abril del 2017	88
Tabla 3.10 Datos del índice de mantenimiento probabilidad de fallos.....	90
Tabla 4.1 Monitoreo de equipo mediante sensores.....	115
Tabla 4.2 Costo de Análisis de Vibraciones	118
Tabla 4.3 Flujo efectivo del proyecto	127
Tabla 4.4 Índices económicos de evaluación de proyectos.....	128
Tabla 4.5 Período de Recuperación	128
Tabla 8.1 Costos de los materiales para la programación de Arduino	136

Índice de Gráficas

Gráfica 3.1 Mantenimiento Correctivo versus el Preventivo	68
Gráfica 3.2 Muestra de equipos críticos según la evaluación realizada	76
Gráfica 3.3 Diagrama de Pareto del historial de Órdenes de trabajo de mantenimiento de noviembre del 2014 a febrero del 2017	78
Gráfica 3.4 Relación de órdenes de trabajo correctivas con respecto a las preventivas	79
Gráfica 3.5 Comparación entre los costos del mantenimiento según cada sistema	82
Gráfica 3.7 Datos de confiabilidad estadística de los equipos críticos de Facilidades para los meses de marzo y abril	89
Gráfica 3.8 Datos de tasa de probabilidad de fallo de los equipos críticos de Facilidades	91
Gráfica 4.1 Caída de presión en el filtro de aceite	106
Gráfica 4.2 Caída de presión en el filtro de aire	107
Gráfica 4.3 Temperatura de entrada del aire al compresor	109
Gráfica 4.6 Medición de Corriente mediante el sensor de arduino SCT-030-100123	

Resumen

En la actualidad las compañías buscan disminuir de gran manera cualquier gasto que no consideren que produzca, por lo tanto, mantenimiento no queda exento a esta reducción, generando que se introduzcan sistemas modernos de administración del mantenimiento que busquen la reducción de fallas y la utilización de la menor mano de obra posible.

Por lo tanto, el proyecto se desarrolla mediante la metodología de PHM, la cual busca diagnosticar y predecir fallas con el uso del monitoreo en línea de los equipos y sus componentes, en el trabajo se determinaron las variables necesarias a medir en equipos críticos como el compresor de tornillo, bombas de vacío. En el caso del proyecto sólo se trabajó directamente, en el compresor ya que solo se posee un equipo en la compañía, y alrededor del 92% el proceso productivo depende del aire comprimido.

Se determina la forma de cómo almacenar las variables físicas que se miden en el compresor de tornillo utilizando el adquisidor de datos que posee la compañía, tratando de obtener datos para predecir fallas y así evitar un paro inesperado, o bien un sobre mantenimiento del equipo, aplicando el concepto de RUL, el cual se basa en utilizar el equipo o componentes el mayor tiempo posible sin necesidad de hacer cambios antes de tiempo o alargar el tiempo de uso poniendo en peligro al equipo. Como resultados rápidos del proyecto en diagnóstico se obtiene que al utilizar los sensores del compresor se puede alargar el cambio de los filtros de aceite y aire, con esto buscando ahorros por sobre mantenimiento, además, que el aire en la entrada del compresor está alrededor de 4 °C por encima a la temperatura ambiente viéndose afectado la eficiencia del equipo.

Además, para el elemento de PHM el pronóstico se plantea el uso de la metodología probabilísticas de Weibull, el método busca determinar de manera matemática la confiabilidad y tiempo para cambiar un elemento de un equipo.

Palabras claves

PHM (Pronóstico y Gestión de la Salud), Diagnóstico, Pronóstico, RUL (vida útil restante)

Abstract

Actually, companies are looking to greatly reduce any expense that they don't consider to be producing, maintenance is included in this group, for that reason are introduced modern maintenance management systems for reduce faults and use of the least possible labor force.

Therefore, the project is developed using the methodology of PHM, which seeks to diagnose and predict failures with on line monitoring on equipment and its components, in this work were determined the variables needed to measure in critical equipment such as screw compressor, vacuum pumps and air conditioners. In the case of the project only worked directly in the compressor because the company just has on, and around 94% the production process depends of the compressed air.

It's determined how to save the physical variable that are measured in the screw compressor using the company's data acquisitor, trying to have data to predict failures to avoid an unexpected stop or over maintenance of the equipment, applying RUL's concepts, which is based on using the equipment or components as long as possible without making changes ahead of time or lengthening the use time putting the equipment in danger. As a quick result of the project in diagnosis it is obtained that when using the sensors of the compressor can be extend the change of oil and air filters, with this looking save money for over maintenance, in addition, that the compressor's air entrance is around 4°C above the ambient temperature being affected the efficiency of the equipment. In addition, for the PHM's element the prognosis arises using the Weibull probabilistic methodology, the method seeks to determine in mathematical way the reliability and time to change an element of a team

Key words

PHM (Prognostics and Health Management), Prognostic, Diagnostic, RUL (remaining useful life).

Capítulo 1 Introducción

1.1 Generalidades de la empresa

1.1.1 Reseña Histórica

La empresa se creó en 1965 por Manfred Zollner, por eso hoy posee el nombre de Zollner Elektronik A.G. En la actualidad la empresa da trabajo alrededor de 8800 personas a nivel mundial. Su sede principal se ubica en Zandt Alemania, pero además posee diferentes sedes alrededor del mundo. Se ubican en: Alemania, Suiza, Hungría, Rumanía, Túnez, China, Japón, Estados Unidos y Costa Rica, este último como único país en Latinoamérica. Cabe destacar que Zollner se encuentra entre las 15 empresas líderes a nivel mundial en el campo de manufactura y desarrollo electrónico.

Zollner Costa Rica, posee alrededor de 330 empleados, en su planta ubicada en el parque industrial La Lima, Cartago, aquí se encarga en ensamblar las tarjetas electrónicas diseñadas en Estado Unidos, se reciben los componentes electrónicos y mediante el proceso productivo se encarga de colocar los dispositivos generando finalmente la tarjeta electrónica. Además, se encargan en producir para una empresa médica las bombas de insulina.

Es importante mencionar que Zollner Electronics Costa Rica Ltda., posee certificaciones en las normas ISO 9001 (calidad), ISO 14000 (Gestión ambiental) y TS16949 (fabricación automotriz), estos títulos le dan gran referencia a la empresa, ya que son la carta de presentación para poder optar por grandes clientes como BMW, Volkswagen, Tesla, entre otros, que son grandes compañías cuyo producto final son automóviles.



Figura 1.1. Diferentes sedes a nivel mundial de la empresa Zollner Costa Rica

Fuente: Zollner Electronics (2017)

1.1.2 Organigrama Zollner Costa Rica

A continuación se muestra el organigrama de la empresa Zollner Costa Rica, que al ser tan extenso, sólo se va a presentar los miembros que componen el Departamento de Mantenimiento, ver Figura 1.2. Es necesario indicar que el Departamento de Mantenimiento se divide en dos sectores, uno encargado del área de facilidades, y el otro se encarga de las máquinas de producción, es un tipo de organigrama descentralizado ya que no tiene relación directa Mantenimiento con Producción.

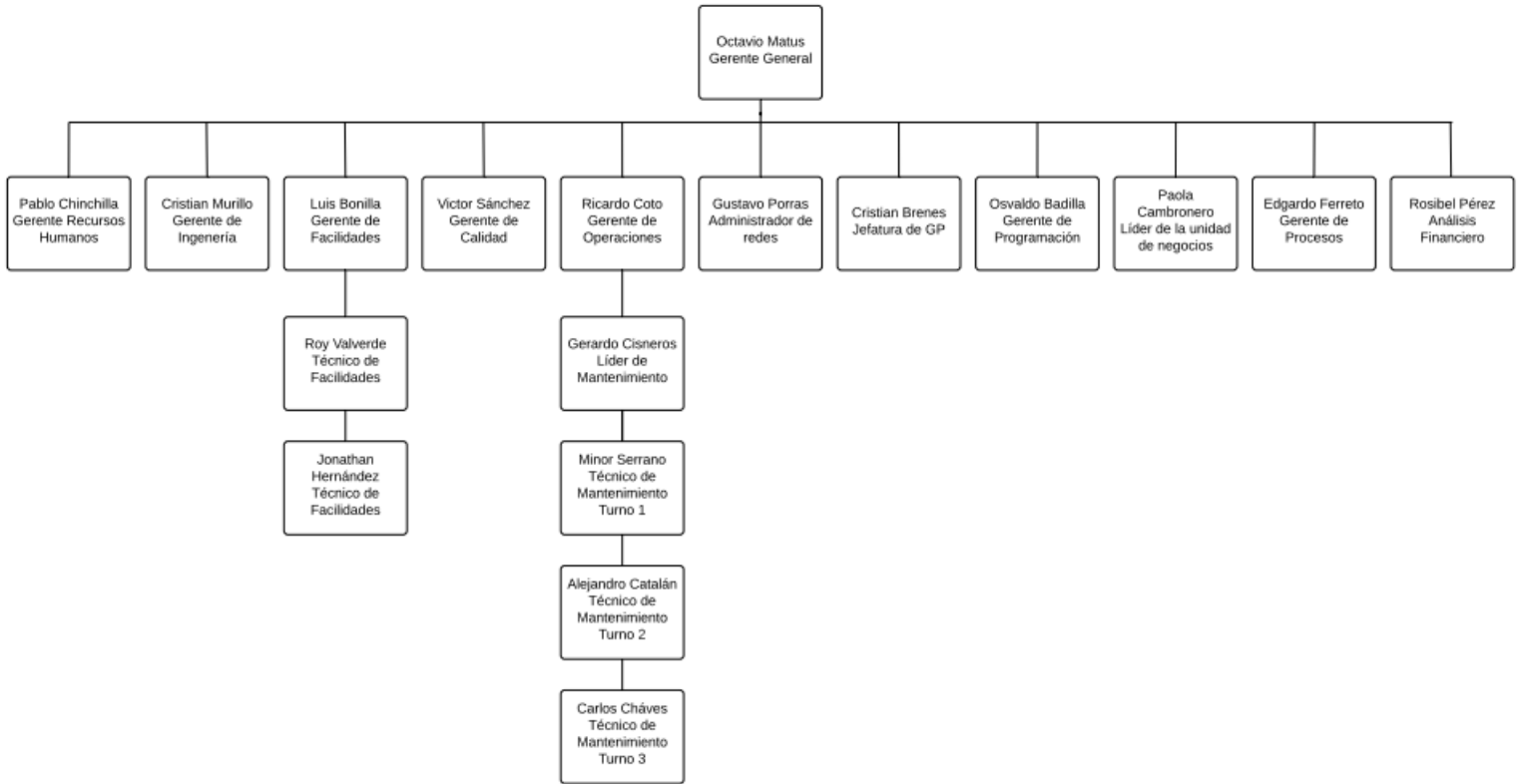


Figura 1.2 Organigrama Empresa Zollner Costa Rica
Fuente: Recursos Humanos (Lucid Chart)

1.1.3 Misión

Mercado: Industria Electrónica & Automotriz

Mercado Meta: Norte América

Productos: Tarjetas de circuito impreso y Mecatrónica

Diferencial: Una fuerza laboral altamente educada y talentosa, experiencia y mejora continua de nuestros procesos.

1.1.4 Visión

“Convertirnos en la unidad de negocio más atractiva del Grupo Zollner con bajo costo, alta calidad y rentabilidad.” (Departamento de Recursos Humanos, Empresa Zollner Electronic Ltda., 2017)

1.1.5 Política Ambiental

En Zollner Electronics Costa Rica estamos comprometidos con el ambiente mediante la prevención de la contaminación, cumpliendo con la legislación de Costa Rica y los requerimientos aplicables a través de los objetivos, metas y procesos de mejora continua.

1.1.6 Política de Calidad

En Zollner Electronics Costa Rica estamos comprometidos a satisfacer los requerimientos de nuestros clientes mediante altos estándares de calidad, entregas a tiempo, precios competitivos y procesos de mejora continua

1.1.7 Ubicación Geográfica

La empresa se ubica en la provincia de Cartago, cantón Central, distrito San Nicolás, específicamente, en el Parque Industrial La Lima, 300 metros oeste del Almacén Fiscal del Banco Crédito Agrícola de Cartago.

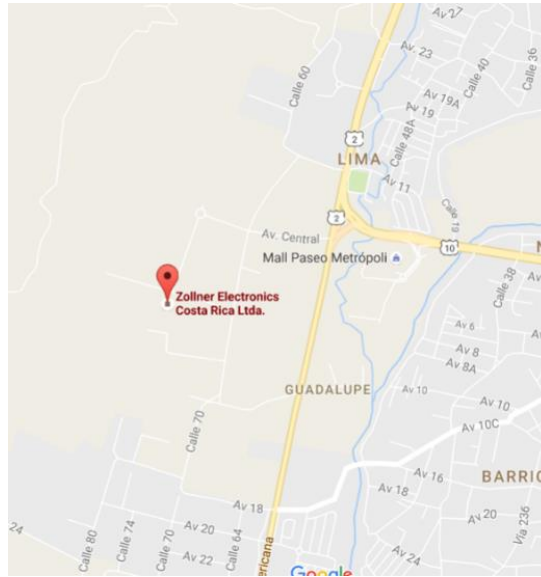


Figura 1.3 Ubicación Geográfica Zollner Electronics Costa Rica

Fuente: Google Maps (2017)

1.2 Descripción del Proceso Productivo

A continuación se muestra el proceso productivo de la compañía, desde la recepción de componentes necesarios para el ensamble de las tarjetas, hasta la prueba y despacho de las tarjetas electrónicas, donde todas tienen que probarse, y comprobar que su funcionamiento sea el correcto para las cuales fueron fabricadas.

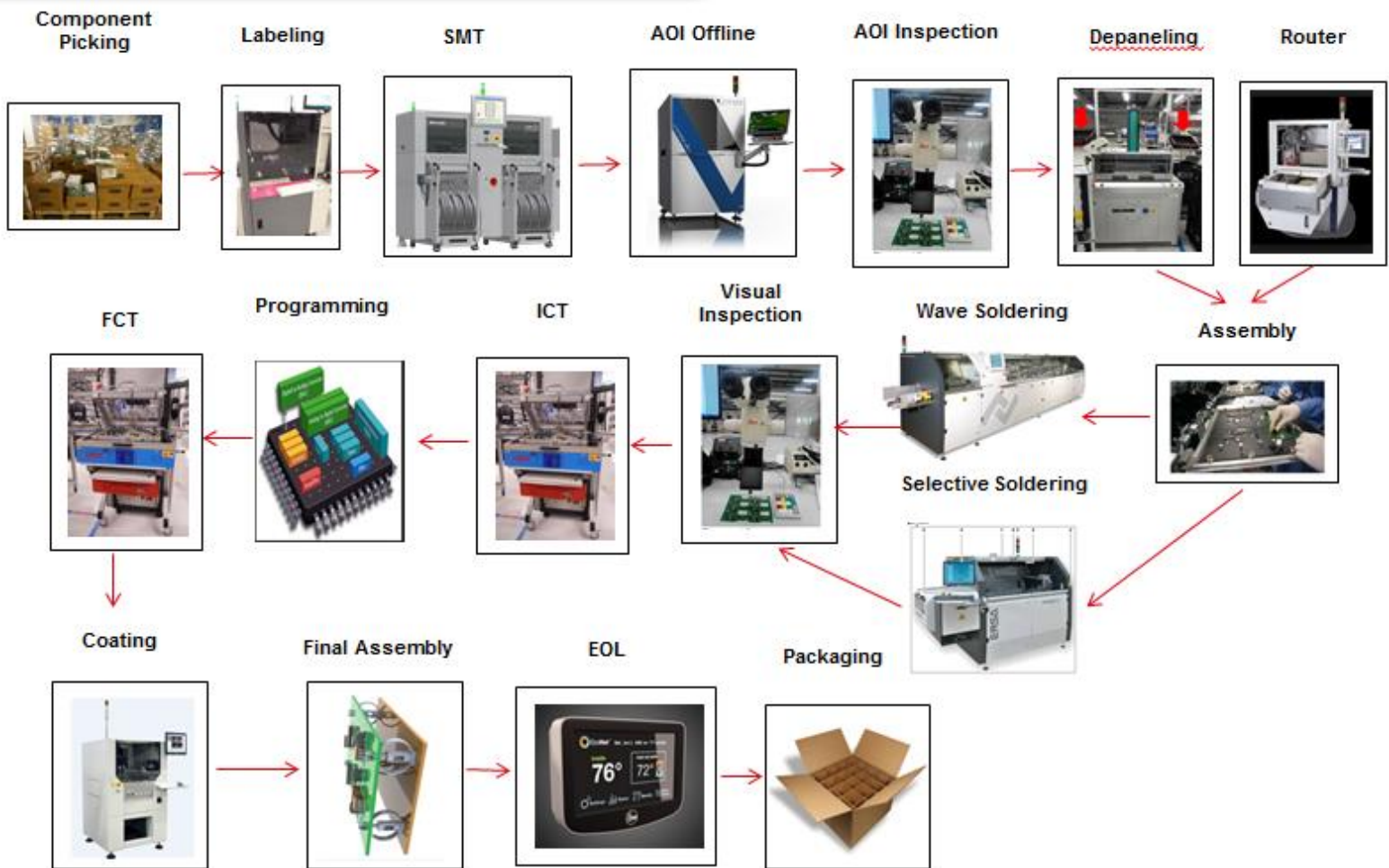


Figura 1.4 Descripción del Proceso Productivo

Fuente: Departamento Planeación de Zollner Costa Rica (2017)

Como se puede ver en la Figura 1.4 el inicio del proceso productivo es cuando se recibe el material (componentes electrónicos, PCB, cables, soldadura), luego la tarjeta y su base se codifican, es decir, se les coloca una etiqueta para obtener rastreo del mismo si algo falla en la pieza durante el proceso o cuando ya está en funcionamiento, con este se logra determinar en qué momento específico falló.

Luego del etiquetado se continúa a colocando la pasta que posteriormente, se va a calentar para soldar los componentes a la tarjeta, después de esto se genera el ensamble de componentes más pequeños este proceso se conoce como SMT, Superficial Mounting Technologic por sus siglas en inglés (Tecnología Montaje Superficial), ya cuando la tarjeta electrónica tenga los componentes más pequeños se procede a pasar por el horno el cual a una temperatura dada se calienta la pasta que se había agregado anteriormente, y ya los componentes quedan ensamblados a la tarjeta, cabe rescatar que el horno usa nitrógeno con el fin de desplazar la mayor cantidad de oxígeno de la tarjeta con el fin de producir una mejor soldadura libre de oxígeno, a continuación se colocan las tarjeta en contenedores que los transportan para su correcta inspección, estos contenedores se les conocen como magazines.

Al estar dentro de los magazines se procede la inspección mediante la máquina conocida como AOI en sus siglas en inglés Automatical Optical Inspection (Inspección visual automatizada), donde mediante fotografías compara la tarjeta con el patrón, donde lo que hace es verificar que no hagan falta componentes y que estos estén bien colocados en la PCB, la idea es separar el producto conforme del no conforme, para luego que el último sea verificado por un especialista que va a indicar que si la pieza se puede re-trabajar o es scrap (producto de desecho).

A continuación, las piezas conformes se pasan a la máquina conocida como depaneling-router donde mediante moldes se colocan las tarjetas y esta máquina se encarga de separarlas de la tarjeta madre. Cuando ya están separadas se procede a colocar los componentes más grandes y que atraviesan la máquina esto se conoce como procedimiento de THT, Through Hole Technology por sus siglas en inglés (Tecnología a través de orificios) este procedimiento se coloca manualmente, es decir, no existe máquinas que realicen este proceso.

Luego se procede a colocar soldadura a las tarjetas ya con todos los componentes colocados, este se puede realizar mediante dos métodos selective soldering o wave soldering, donde usar alguno de los dos va a depender del cliente de la tarjeta, ya que el primero de ellos es más costoso que el otro.

Al terminar con la soldadura la tarjeta se lleva a realizar las pruebas eléctricas, donde cada tarjeta se debe de probar su correcto funcionamiento, esto se conoce como ICT, Inspection Circuit Technology (Tecnología de inspección del circuito), luego que se prueban las tarjetas se procede a programarlas esto va a depender si el cliente lo solicita. Si las tarjeta se programan se continúan a probarlas, esto se realiza con la máquina llamada FCT, posterior a esto las tarjetas son enviadas a coating donde aquí se les coloca un recubrimiento para proteger a la PCB y componentes del polvo y humedad. A continuación se procede al proceso de “Final Assembly”, donde se agregan los últimos componentes, y cables que sean necesarios para la conexión de la tarjeta. Luego se procede a la prueba final del equipo, por ejemplo, si el equipo se creó para una aplicación de control de aire acondicionado se procede a probarla para esta función, para que el cliente tenga la garantía que el producto funciona. Ya el último paso es empaquetar correctamente el producto para evitar problemas en el transporte de las tarjetas, y que el cliente reciba un producto 100% funcional.

1.3 Descripción del Proyecto

1.4 Objetivos del Proyecto

1.4.1 Objetivo General

1. Desarrollar un modelo de gestión de mantenimiento basado en PHM para la determinación de la confiabilidad estadística de los equipos críticos del área de facilidades (compresor, bombas de vacío) mediante la toma de variables físicas y generando datos probabilísticos para la creación de rutinas de mantenimiento.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Definir las variables físicas necesarias en los equipos críticos (compresor de tornillo, bombas de vacío) para la predicción de fallas hacia una futura implementación del modelo de PHM para febrero de 2017.
2. Determinar un modelo automático para la recolección de datos de variables físicas proyectando rutinas de mantenimiento según la condición para el compresor de tornillo de 60 hp para marzo de 2017.
3. Valorar un modelo de alerta con mantenimiento propio (self-maintenance) para el equipo crítico del área de facilidades (compresor de tornillo) produciendo datos para el análisis de los mismos para abril del 2017.
4. Proyectar los costos de la implementación de la propuesta determinando la viabilidad del mismo para mayo del 2017.

1.5 Descripción del Proyecto

En la actualidad la empresa terceriza el mantenimiento de los equipos, poseen una estructura de mantenimiento definida correspondiente a dos técnicos y al Gerente de

facilidades. No se posee una misión y visión del Departamento, utilizan mantenimiento preventivo pero sus rutinas son dadas por los fabricantes o por las empresas que brindan el servicio de mantenimiento. No poseen una estructura de índices de mantenimiento, por lo tanto, no tienen una idea clara de que si el mantenimiento que están realizando es el correcto.

Al ser una empresa nueva en inicio de operaciones en Costa Rica, no se les ha presentado una falla ya que los equipos son nuevos, por lo tanto, la curva de rendimiento es la más óptima. Además nunca ha realizado alguna rutina de mantenimiento predictivo por lo tanto no poseen datos para poder aplicar el modelo basado en PHM, por esa razón, es que la propuesta es realizar las bases necesarias para poder aplicar el modelo de PHM.

La necesidad de realizar el proyecto nace, cuando no se posee rutinas de mantenimiento realizado por los miembros de la empresa, y sólo se ejecuta lo recomendado por las compañías encargadas de dar mantenimiento a los equipos.

Otra razón de realizar el proyecto se debe a la necesidad que posee la compañía en mejorar cada año en todas sus áreas, es por motivo de las constantes auditorías que están sometidos, debido que son ISO 9001, referente a calidad. Por lo tanto el proyecto les va ayudar a evidenciar que están realizando constantes mejoras en el área de mantenimiento, donde han tenido algunos problemas por motivo de que en los últimos tres años no han implementado acciones de mejora en su estructura, ya que a los largo de los últimos 3 años el mantenimiento empleado ha sido en un mayoría preventivo y correctivo, un poco de predictivo, pero de este no se posee un gran historial de haberlo aplicado.

Optar cada año por la auditoría calidad ISO 9001 es muy importante ya que la mayoría de los clientes de la empresa buscan que sean acreditados por esta norma, por esa razón la empresa se encarga de realizar las constantes auditorías, donde evalúan cada

departamento, y tienen que presentar evidencias de como con nuevas técnicas pueden ayudar a las constantes mejoras del proceso productivo.

La idea del proyecto se basa en realizar las bases para una posible aplicación a un futuro del modelo PHM, el cual se basa en mantenimiento basado en la condición para luego determinar las rutinas necesarios de mantenimiento de los equipos, además el desarrollo de este modelo se basaría en proponer un mantenimiento propio (self-maintenance) para emitir alertas cuando el equipo no esté funcionando de manera correcta.

Lo primero a realizar en el proyecto es determinar las variables físicas, el método de recolección de datos y su interpretación para poder aplicar el modelo de PHM en la empresa.

Se busca que mediante tipos de gestión de mantenimiento modernos se mejore la confiabilidad y disponibilidad de los equipos, ya que algunos equipos de facilidades son necesarios para la ejecución de producción, como por ejemplo, el compresor de aire, el cual es esencial para las máquinas de producción.

La idea de diseñar un sistema de mantenimiento propio (self-maintenance) nace con el fin de proporcionar al gerente o al técnico a cargo una alerta de cuando un sistema del equipo está en buen, intermedio o mal estado, y con esto generar la orden de trabajo para cambiar la pieza dañada.

1.6. Metodología

Tabla 1.1 Metodología de trabajo para el desarrollo del proyecto

Etapa	Objetivo Planteado	Actividades
1	Proponer un modelo basado en PHM para el mejoramiento de la confiabilidad de los equipos del área de facilidades mediante la toma de variables físicas y generando datos probabilísticos para la creación de rutinas de mantenimiento.	<p>Buscar ejemplos de donde se aplicado el modelo PHM</p> <p>Analizar los pasos necesarios para la implementación del modelo</p>
2	Definir las variables físicas necesarias en los equipos críticos (compresor de tornillo, manejadoras de aire acondicionado, bombas de vacío) para la predicción de fallas hacia una futura implementación del modelo de PHM para febrero de 2017	<p>Primero se va a determinar cuál es el equipo más crítico mediante tabla de criticidad</p> <p>Analizar fichas técnicas de los equipos y manuales de usuarios</p> <p>Revisar las rutinas de mantenimiento actuales que son dadas por los fabricantes o proveedores de los equipos</p> <p>Determinar los diferentes sistemas que componente el equipo más crítico de la planta</p>
3	Determinar un modelo automático para la recolección de datos de variables proyectando rutinas de mantenimiento según la condición de los equipos críticos para marzo de 2017	<p>Esto se va a lograr mediante la propuesta de compra o alquiler de equipos para mantenimiento basado en la condición</p> <p>Verificar mediante alguna tabla de Excel si se puede ingresar los datos para almacenar la información</p> <p>Revisar si el software que la empresa posee puede usarse para poder recolectar y almacenar datos.</p> <p>Utilizar el datalogger instalado en la compañía.</p>
4	Valorar un modelo de alerta con mantenimiento propio (self-maintenance) para el equipo crítico del área de facilidades (compresor de tornillo) produciendo datos para el análisis de los mismos para abril del 2017.	<p>Investigar como de manera económica se podría plantear un sistema automático para poder realizar el mantenimiento propio.</p> <p>Buscar información sobre aplicaciones que puedan existir en el mercado para satisfacer el fin requerido.</p> <p>Buscar en tesis o papers de automatización que hayan realizado este tipo de dispositivos.</p> <p>Verificar las señales que entrega el compresor como por ejemplo: voltaje, temperatura de rodamientos</p> <p>Proponer el uso de sensor mediante Arduino para medir corriente</p>
5	Proyectar los costos de la implementación del proyecto determinando la viabilidad del para mayo del 2017	<p>Se buscará el costo de comprar o alquilar el equipo de mantenimiento basado en la condición, como analizador de vibraciones, cámara termo gráfica, análisis de aceite, ultrasonido, esto va a depender de las variables determinadas en la etapa 3.</p> <p>Luego determinar aproximadamente en cuánto tiempo se va a tardar para poseer datos confiables para poder aplicar el modelo planteado.</p> <p>Analizar el costo de mano obra que se deba utilizar para poder realizar el análisis.</p> <p>Analizar el costo del sistema para el self maintenance.</p>

Fuente: Elaboración Propia (Word)

1.6 Cronograma

Tabla 1.2 Pasos de la realización del proyecto

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
Realización del Proyecto de graduación	106 días	lun 09/01/17	lun 05/06/17
Inducción en la empresa	7 días	lun 09/01/17	mar 17/01/17
Análisis de equipos críticos	1 día	mié 18/01/17	mié 18/01/17
Buscar información sobre PHM	11 días	jue 19/01/17	jue 02/02/17
Análisis de estructura de Mantenimiento	2 días	vie 03/02/17	lun 06/02/17
Investigar sensores con Arduino para colocar en el equipo crítico de la empresa	2 días	mar 07/02/17	mié 08/02/17
Revisión de planes de mantenimiento de la empresa	7 días	jue 09/02/17	vie 17/02/17
Investigar cómo colocar el sensor de corriente del Arduino, programarlo	3 días	lun 20/02/17	mié 22/02/17
Análisis de los historiales de mantenimiento que posee la empresa	7 días	mié 01/03/17	jue 09/03/17
Identificar variables físicas a medir (uso de papers, manuales de usuario)	6 días	vie 10/03/17	vie 17/03/17
Hacer pruebas con el sensor de Arduino	3 días	lun 20/03/17	mié 22/03/17
Determinar la mejor forma de recolectar datos	4 días	jue 23/03/17	mar 28/03/17
Cotizar acciones de mantenimiento predictivo para los equipos críticos	1 día	mar 11/04/17	mar 11/04/17
Cotizar dispositivos para medición de vibraciones	4 días	mié 12/04/17	lun 17/04/17
Codificar las máquinas de Facilidades	1 día	mar 18/04/17	mar 18/04/17
Análisis del sistema de recolección de datos que posee la compañía	5 días	mié 19/04/17	mar 25/04/17
Realizar fichas técnicas	1 día	mié 26/04/17	mié 26/04/17
Investigar sobre costos de equipo de predictivo	5 días	jue 27/04/17	mié 03/05/17
Determinar costos de mano de obra, y si se posee suficiente personal	4 días	jue 04/05/17	mar 09/05/17
Análisis de los datos medidos con los sensores	6 días	vie 12/05/17	vie 19/05/17
Crear la propuesta de índices de mantenimiento	4 días	lun 22/05/17	jue 25/05/17
Realizar la propuesta de posibles cambios en actividades de mantenimiento	5 días	vie 26/05/17	jue 01/06/17
Explicar lo logrado al gerente de mantenimiento	1 día	vie 02/06/17	vie 02/06/17
Presentación final del proyecto	1 día	lun 05/06/17	lun 05/06/17

Fuente: Elaboración Propia (Project 2016)

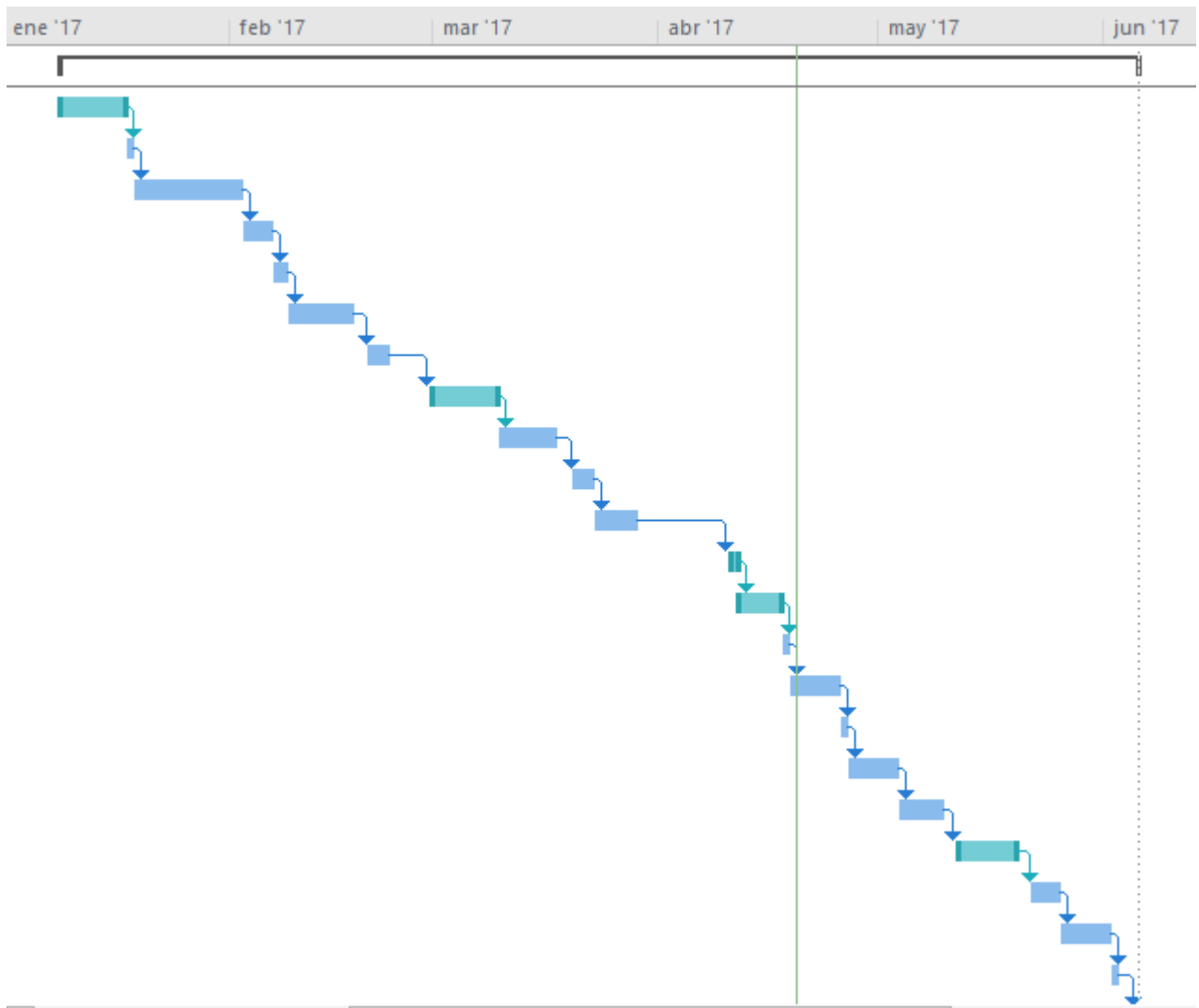


Figura 1.5 Diagrama de Gantt del desarrollo del proyecto

Fuente: Elaboración Propia (Project 2016)

1.7 Alcance del proyecto

El alcance del proyecto será determinar las bases necesarias para una correcta implementación del modelo de PHM en los equipos críticos del área de facilidades, cumpliendo con los objetivos planteados, donde en un futuro proyecto ya se pueda aplicar el modelo, cuando ya existan datos confiables para la determinación de actividades de mantenimiento y la predicción de fallas en un futuro.

El fin del proyecto es crear la base para determinar la condición del equipo mediante datos reales, y con fundamento ingenieril, siempre buscando que el equipo trabaje de manera eficiente, con la mejor disponibilidad y confiabilidad posible.

Estas bases serían determinar las variables físicas medibles para un correcto mantenimiento predictivo, luego determinar el costo de la implementación con el fin de determinar si es factible el proyecto, establecer la recolección de datos con sensores, y con el uso de métodos probabilísticos con el fin de determinar rutinas de mantenimiento.

1.8 Limitaciones del proyecto

En la empresa no cuenta con todos los equipos de medición necesarios, por lo tanto, la idea es plantear la necesidad de poseerlos para que el gerente emita la orden de comprarlos. Por lo tanto la recolección de datos se propondrá por el momento para las variables que sí se puedan leer. No afecta los objetivos ya que no se va a implementar el diseño de la gestión del mantenimiento, solamente se van a proponer un sistema de toma de datos. Además el poco mantenimiento predictivo que se realiza es por parte de una empresa contratada, donde ellos no entregan informes detallados de los datos medidos, por lo tanto, no existe un historial concreto de las pruebas realizadas.

Otra limitación es que no se posee la información directa, es decir, la compañía posee bases de datos con mucha información, pero a la cual para poder acceder se debe de tener un usuario creado para los miembros permanentes en la empresa, por lo tanto, cuando se requiere alguna información se debe de solicitar al encargado del área lo que muchas veces no saben dónde guardan información de años anteriores.

1.9 Impacto del proyecto a la sociedad

El proyecto se fundamenta en ser parte de la mejora continua de la empresa, donde cada año se realizan auditorías según la norma que se quiere alcanzar, la empresa posee certificación ISO 9001, que corresponde a la norma de calidad, por lo tanto, como se ha mencionado en la descripción del proyecto, este trabajo forma parte importante para la próxima auditoría del Departamento de Facilidades, correspondiente al año 2017.

El año anterior el Departamento por poco no lo aprueban en la certificación ya que no se consiguieron mejoras en los procedimientos de mantenimiento, por ello es que este trabajo tiene gran peso, ya que va a contribuir a pasar la próxima auditoría, porque posee ideas innovadoras, como el uso de sensores para el continuo monitoreo de los equipos, además de ir creando una idea predictiva en la empresa, con el fin de diagnosticar y pronosticar fallas en el equipo.

Esto afecta directamente a la sociedad, ya que si no se posee la certificación ISO 9001 calidad, la mayoría de clientes dejarían de comprar los servicios de la compañía, provocando despidos de funcionarios, donde muchas familias dejarían de recibir dinero. Además, muchas empresas le dan servicio a Zollner, por lo tanto, si no se produce ellos también se verían afectados, es una reacción en cadena.

1.10 Impacto del proyecto al medio ambiente

El trabajo va a beneficiar al medio ambiente en el ahorro de uso de repuestos, como el filtro de aceite, donde, este no se puede reciclar 100%, ya que al estar contaminado es muy difícil limpiarlo. Además, mediante el monitoreo de los equipos, se puede determinar formas de ahorro energético, ya que mediante un correcto control de las máquinas se puede reducir la huella de carbono de cada uno, mejorando la de toda la planta, esto se lograría apagando máquinas cuando el proceso productivo no lo requiera, o economizando en las de tarifa pico.

La compañía posee certificación ambiental ISO 14001, que corresponde a la correcta gestión ambiental, donde este proyecto se va a ver reflejado en futuras auditorías, ya que puntos importantes que se califican son ahorros energéticos, mejoras continuas de los departamentos de la compañía, además, se relaciona directamente con la ISO 9001 referente a calidad, donde como se mencionó anteriormente, el proyecto también ayuda a conseguirla.

2 Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Historia de Mantenimiento

El mantenimiento dentro de las empresas surge durante la revolución industrial en la que poco a poco se fue descubriendo la necesidad de arreglar las máquinas que se dañaban durante los procesos productivos. El problema consistió en que durante esta época no existía un orden dentro del mantenimiento y este era en su totalidad correctivo, es decir, sólo se arreglaba la máquina cuando ya no producía en lo absoluto. Los paros representan una pérdida de dinero ya que hay menor producción.

En los alrededores del siglo XX se generan los primeros registros estadísticos dentro de la industria de la aeronáutica, estos posteriormente ayudarán al levantamiento de registros para mantenimiento.

Con el auge de la primera guerra mundial se elevó la producción en serie de armamentos, municiones, entre otros artefactos de guerra. Debido a lo anterior, los programas de producción fueron mejorando poco a poco y por ello se crearon equipos para dar mantenimiento. Pero no fue hasta después de la segunda guerra mundial en Japón que se crea el mantenimiento preventivo, debido a que los japoneses acababan de salir de una guerra donde se afectó considerablemente su país por los ataques de bombas atómicas y otros, esto provocó una mentalidad de cuidado a los equipos por parte de los habitantes ya que no había suficientes recursos para estar reparando las máquinas. Como parte de las medidas tomadas por estos, están el seguir las recomendaciones del fabricante, el conocimiento de los dispositivos que usan, entre otras.

En el año 1966 se creó el mantenimiento predictivo, el cual se encarga mediante varios métodos y acciones de predecir fallas en los equipos. Esto se logró gracias al conocimiento pleno de los instrumentos de protección, medición y los instrumentos de trabajo.

Con respecto al mantenimiento preventivo se tiene la siguiente afirmación:

“Si el mantenimiento se define como el aseguramiento de que una instalación, un sistema de equipos, una flotilla u otro activo fijo continúen realizando las funciones para las que fueron creados, entonces el mantenimiento preventivo es una serie de tareas planeadas previamente que se llevan a cabo para contrarrestar las causas conocidas de fallas potenciales de dichas funciones.” (Duffua et al., 2002)

Como se puede apreciar en la cita anterior, el mantenimiento preventivo es un tipo de mantenimiento organizado en el tiempo que permite mediante inspecciones y otros tipos de tareas contrarrestar y detectar a tiempo las causas de fallas en los equipos. Este se diferencia del mantenimiento correctivo debido a que según los mismos autores este mantenimiento va a definirse como aquel en el que se ven involucradas reparaciones, reemplazos, renovaciones, entre otros de los componentes de un equipo.

La siguiente generación del mantenimiento es crear sistemas automatizados donde se puedan generar alertas cuando algún componente o sistema del equipo esté dañado o requiera de una pronta atención por parte del departamento de mantenimiento, este tipo de mantenimiento se conoce como self-maintenance (mantenimiento propio). En la Figura 2.1 resume cronológicamente la historia de cómo se ha desarrollado el mantenimiento respecto a las disposiciones de producción.

Además, la tendencia del mantenimiento es poseer el monitoreo completo de los equipos, poseer información real y actualizada de cómo se comporta la máquina, medir consumo, corriente, voltajes, temperatura, flujo, presión, son variables físicas que son muy frecuentes medir en los equipos.

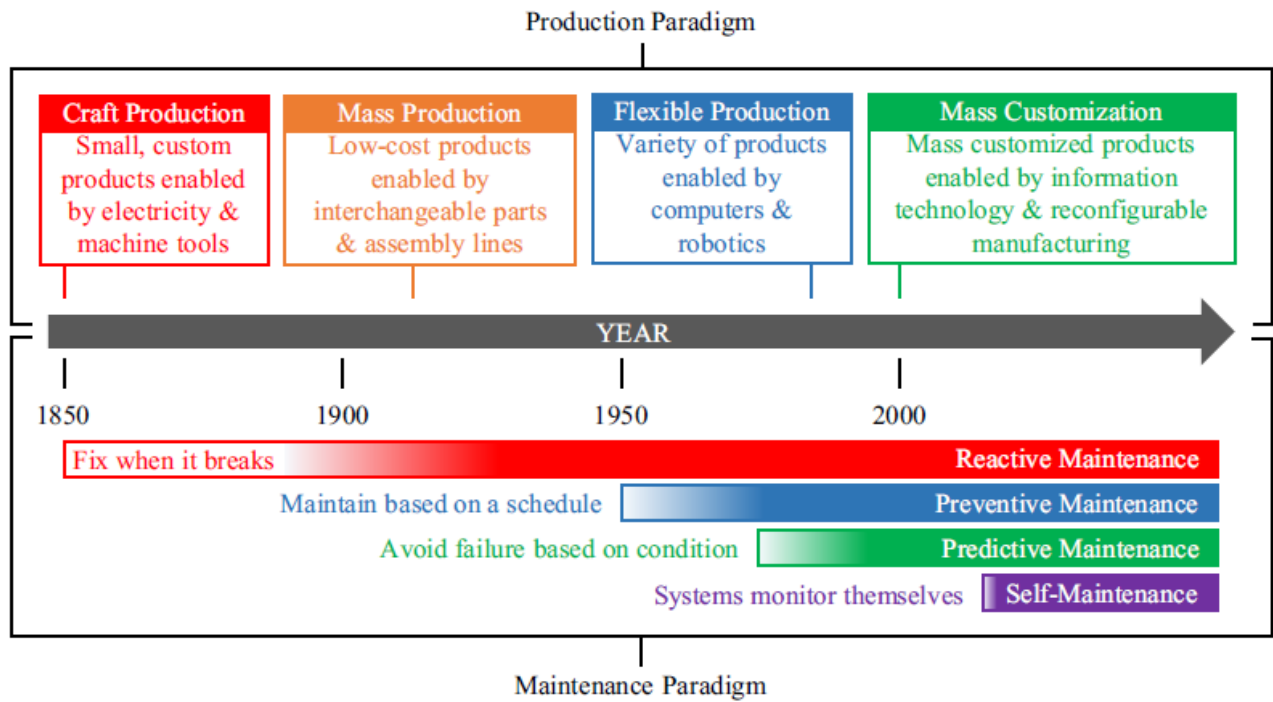


Figura 2.1 Desarrollo del mantenimiento en la historia
 Fuente: (Vogl, Weiss, & Helu, 2016)

2.2 Tipos de Mantenimiento

A continuación se va a explicar cada tipo de mantenimiento existente y se va a observar la diferencia entre cada uno de ellos

2.2.1 Correctivo

Este tipo de mantenimiento es el más antiguo de todos, para este tipo de mantenimiento no existe los paros planeados, es posible incurrir a riesgos en seguridad, en ocasiones no se poseen los repuestos necesarios ocasionando atrasos en la puesta en marcha de la máquina y pérdida de dinero por el paro de la línea de producción. Este tipo de mantenimiento no se va a dejar de usar, ya que en ocasiones es más económico dejar fallar la máquina que realizar costosas rutinas de mantenimiento. Pero siempre se busca que de todos sea el mínimo en cualquier industria.

2.2.2 Preventivo

Este mantenimiento se refiere a la creación de rutinas de mantenimiento con actividades debidamente planeadas, donde no se tiene que esperar hasta que la máquina falle, y con las correctas actividades se ayuda a que la máquina llegue a su punto de vida útil reduciendo el peligro de fallas potenciales de las máquinas. Algunas actividades que se incluyen son lubricación, limpieza, cambio de filtros, ajustes de tuercas y tornillos, remplazar partes, realizar inspección visual de la máquina, entre otras muchas actividades que ayudan al mantenimiento de los equipos.

Otra característica de este tipo de mantenimiento es que tiene la idea de generar datos, con el fin de establecer en un futuro rutinas de mantenimiento, basado en los datos recaudados.

2.2.3 Predictivo

El mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento que relaciona una variable física con el desgaste o estado de una máquina. Se basa en la medición, seguimiento y monitoreo de parámetros y condiciones operativas de un equipo o instalación. A tal efecto, se definen y gestionan valores de pre-alerta y actuación de todos aquellos parámetros que se considera necesario medir y gestionar.

Una característica importante de este tipo de mantenimiento es la tendencia y seguimiento de valores medidos, ya que con un registro de valores se va a poder calcular o prever con algún porcentaje de error cuando el equipo fallará.

2.2.4 Mantenimiento Propio (self-maintenance)

La necesidad del auto-mantenimiento siempre es reducir el mantenimiento no planeado, todas esas visitas no planeadas por parte de ingenieros o técnicos, que van afectar considerablemente los costos de mantenimiento. La idea de este tipo de mantenimiento es desencadenar la detección temprana del desgaste de la máquina, diferentes condiciones de fallas y detección en el momento que un componente no alcance su vida planificada.

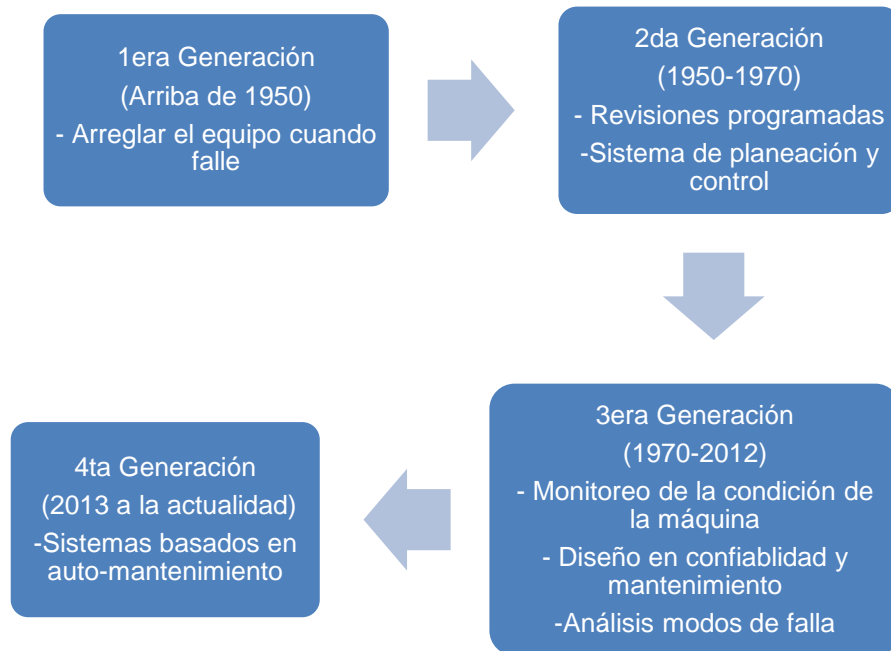


Figura 2.2 Diagrama de evolución del mantenimiento

Fuente: (Singh, Galar, Baglee, & Sten, 2014)

En la actualidad, se vive en un mundo competitivo donde se busca la máxima eficiencia, calidad y productividad de todos los equipos, no se puede detener un equipo por un mantenimiento no planeado, ya que esto puede causar grandes cantidades de dinero perdido, además, una reducción en la credibilidad con el cliente. Por esta razón según (Singh, Galar, Baglee, & Sten, 2014), con el auto-mantenimiento se puede reducir el costo mantenimiento preventivo y eliminar el correctivo, con el fin de optimizar el mantenimiento programado, también con esto se lograría poseer los repuestos necesarios cuando se requiera, y no perder dinero en esperar que lleguen o que estén en bodega, donde la pieza se comienza a degradar sin ningún uso, todo lo anterior busca ahorrar dinero en costos de mantenimiento. Como se ve en Figura 2.2, el mantenimiento que se quiere llegar es al auto-mantenimiento, es un concepto nuevo, por lo tanto, no se existen muchos ejemplos de aplicación, pero poco a poco se ha ido desarrollando.

“Algunos factores que evitan la implementación de este modelo de mantenimiento son: la cultura de los departamentos de mantenimiento, poco apoyo de los altos mandos de las compañías, ignorancia acerca de la necesidad del mantenimiento, costosas inversiones en sensores y actuadores.” (Singh, Galar, Baglee, & Sten, 2014)

2.3 Modelo de PHM

Según (Vogl, Weiss, & Helu, 2016) el objetivo del modelo de pronóstico gestión de la salud es proporcionar información útil de apoyo a la toma de decisiones, esto mediante al monitoreo en tiempo real de los subsistemas y componentes para tomar decisiones en el departamento de mantenimiento, respecto a sus rutinas.

Este modelo incorpora aspectos de logística, seguridad, confiabilidad, criticidad, y estudios de viabilidad económica. Posee de dos componentes que son el diagnóstico y el pronóstico, el primero se refiere al proceso de detección y aislamiento de fallas, mientras que el otro es el proceso de predicción de fallas a un futuro, o bien a la gestión de la salud (vida restante) basado en historial de la condición de la máquina.

Esencialmente, PHM es una metodología que evalúa la confiabilidad de un sistema, en el orden de prevenir y mitigar las fallas, además, de disminuir el sobre mantenimiento generado por rutinas dadas por fabricantes o empresas encargadas de tercerizar el mantenimiento.

“Las mejoras de mantenimiento basado en PHM pueden reducir en alrededor de un 10% el costo total de la mano comparado con un mantenimiento correctivo.” (Barajas & Srinivasa, 2008)

A continuación se muestran tres tipos diferentes de mantenimiento, estos tienen diferencias pero comparten conceptos similares, que son la base para aplicar el modelo de PHM.

2.3.1.1 Mantenimiento basado en la condición (CBM, Condition Based Maintenance)

Como lo dice el nombre se basa en estado o condición del equipo, también llamado mantenimiento predictivo, donde se busca medir el estado de los componentes de los equipos, mediante el uso de variables físicas. Se sabe que algunas técnicas usadas son análisis de vibraciones y aceites, ultrasonido, y termo-grafía. Todas estas técnicas son las más utilizadas en la industria, donde para tener un correcto análisis de resultados se necesita de una gran experiencia en manejo e interpretación de datos, y además es necesario poseer un historial de datos.

2.3.1.2 Monitoreo estructural de la salud del equipo (SHM, Structural Health Monitoring)

Esta disciplina es muy similar a la del monitoreo por condición, pero su origen se desarrolló en la inspección de las estructuras. Este método se basa en las pruebas no destructivas. Técnicas como pruebas de ultrasonido, corrientes de Eddy y emisiones acústicas se aplican mediante el uso de sensores o escaneos que se realizan de manera manual, y periódicamente, es decir, no existe un monitoreo en línea. La idea de este método es enfocarse en incrementar la probabilidad de detección de fallas mediante el uso de pruebas no destructivas.

2.3.1.3 Pronóstico y gestión de la salud (PHM, Pronostics and Health Management)

Según (Tinga & Loendersloot, 2014) esta disciplina es la más reciente de las tres, donde relaciona las anteriores, CBM y SHM se dedican a monitorear el estado de la máquina, y PHM, es una técnica más integral, provee lineamiento para un manejo correcto de la salud del sistema, de esta manera, la filosofía se basa en la gestión del ciclo de vida enfocada en pronosticar las fallas y las rutinas del mantenimiento.

2.3.2 Diagnóstico

Generalmente el uso de sensores se da porque con ellos se puede determinar de manera sencilla una posible falla en el sistema, pero el problema es que no todos tienen la capacidad de procesar la información correcta en el momento preciso cuando vaya a ocurrir la falla, por lo tanto, se utilizan métodos robustos para diagnosticar el equipo y conocer la causa raíz de los problemas.

También se puede utilizar actividades predictivas como fin de generar un registro del equipo, las técnicas que se pueden utilizar son termo-grafías, análisis de vibraciones, de aceites, ultrasonido, análisis no destructivos, todas estas son utilizadas para diagnosticar el equipo lo cual también es una forma de comenzar a aplicar el método de PHM.

“Se conoce como falla la salida de una variable de su patrón de medición es decir que se sale del rango correcto de medida. La causa fundamental de una falla, se le llama causa raíz, ya que una falla puede provocar diferentes problemas en un equipo.” (Vogl, Weiss, & Helu, 2016)

El diagnóstico se utiliza para detectar o aislar posibles fallas en las máquinas, por esa razón es necesario poseer un monitoreo constante de variables físicas en el equipo, e historial-de-fallas-o-del-predictivo-que-se-realice.

Un correcto pronóstico se deriva de un correcto diagnóstico, es necesario poseer diagnóstico robusto, ya que cualquier incertidumbre en los datos puede afectar cualquier predicción futura.

Según (Vogl, Weiss, & Helu, 2016) es muy frecuente que sucedan alertas erróneas en los sensores, por esa razón es que es necesario tener filtros en la validación y verificación de datos obtenidos, ya que esto puede ocasionar predicciones inexactas, ocasionando problemas en el momento de crear rutinas de mantenimiento, por ejemplo, se puede realizar un sobre mantenimiento si se crea alguna rutina de mantenimiento provocada por alguna alerta temprana, o bien se puede atrasar un rutina provocando que se dañe el equipo, esto ocasionado por una alerta que no se encendió a tiempo. Por esta razón, además de poseer un sistema de monitoreo en línea es necesario tener un correcto historial de datos del equipo, y siempre mantener los equipos o sensores calibrados correctamente.

2.3.3 Pronóstico

Según (Vogl, Weiss, & Helu, 2016) este elemento del método de PHM es el más desafiante de todos, ya que se necesita de una correcta aplicación de los métodos matemáticos probabilísticos para pronosticar una posible falla, además, depende del diagnóstico, también, se debe a que algunas fallas son muy intermitentes por lo tanto es complicado predecirlas. Pero cabe rescatar que si se aplica bien el pronóstico, este elemento se vuelve el más importante del método, ya que entrega resultados beneficiosos. Es recomendable tomar valor de referencia del fabricante del equipo, esto cuando nunca se ha medido o llevado un control de la variable.

Pronóstico es esencialmente basado en la condición de la máquina, donde se debe de estimar la vida útil restante (RUL, remaining useful life) del equipo con el fin de mejorar la información de las decisiones tomadas de mantenimiento. RUL, se basa en predecir los ciclos de tiempo antes de que el funcionamiento del proceso tenga una falla, provocando detener el equipo. Se dice que sin una correcta medición de datos y sin el correcto análisis determina el RUL es poco útil, ya que va a entregar resultados erróneos y poco confiables.

Según (Ly, 2009) el elemento pronóstico se puede llamar el talón de Aquiles del método de PHM, porque un incorrecto resultado ocasiona que falle todo el método, todo el esfuerzo y dinero generado en los anteriores pasos puede ser desperdiciado sino se realiza un correcto análisis de datos y resultados.

El fin del pronóstico es prevenir posibles fallas en el sistema, y mitigar problemas potenciales con una correcta planificación en el plan de mantenimiento, y así evitar grandes pérdidas por paros no programados.

Para poder aplicar el elemento del pronóstico del PHM es necesario conocer correctamente, las máquinas de la empresa, esto debido a que se sabe que los elementos mecánicos pueden tener gran cantidad de causas de falla, por lo tanto, en ocasiones no es factible determinar el RUL de los elementos del equipo, ya que hay muchas variables que lo afectan, y no conocer la máquina ocasionaría mayor margen de error. Además, es necesario saber cómo colocar los sensores, ya que una mala ubicación del mismo ocasionaría datos erróneos, que como se mencionó anteriormente, llega a afectar el pronóstico de falla.

2.3.4 RUL (Remaining Useful Life)

RUL, que significa restante vida útil, se refiere al tiempo restante antes de que un componente realice sus capacidades funcionales antes de que falle. La idea de conocer este concepto es lograr determinar conjunto el pronóstico en el momento exacto de cuándo falla un componente, trayendo muchas ventajas en el departamento de mantenimiento, como reducir el mantenimiento preventivo en aquellos componentes que se monitoreen en línea, planear los repuestos que se tengan en bodega evitando la pérdida de vida útil por estar almacenado mucho tiempo, se puede coordinar con proveedores cuando tener los repuestos, se disminuiría la cantidad de paros de la máquina para realizar mantenimiento.

Según (Okoh, Roy, Mehnen, & Redding, 2014), RUL se puede determinar por diferentes métodos, que se van a explicar a continuación:

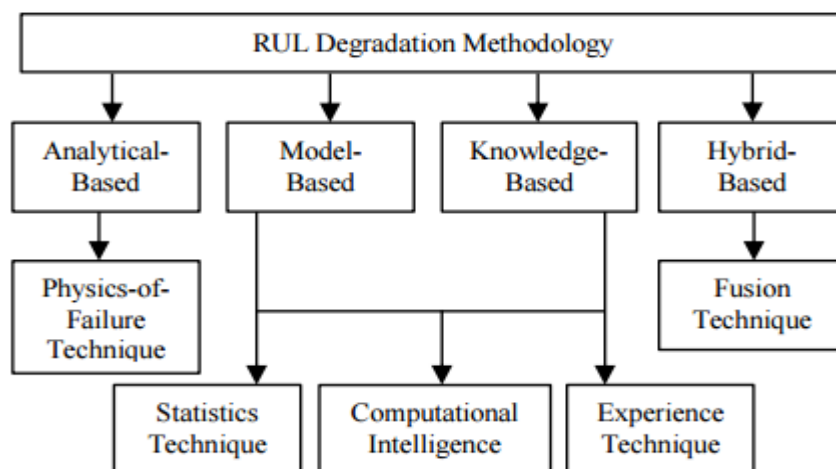


Figura 2.3 Diferentes técnicas para pronosticar la vida útil restante (RUL)

Fuente: (Okoh, Roy, Mehnen, & Redding, 2014)

2.3.4.1 Basado en Modelos

La predicción del RUL es aplicable a los enfoques de estadística e inteligencia computacional, estos modelos se derivan de la configuración, el uso y los datos históricos del método de “funcionar hasta que falle” o como mejor se conoce dejar fallar, siendo muy aplicable para las decisiones que se deba de aplicar en el mantenimiento.

Según indican los autores se puede utilizar modelos como los modelos ocultos de Markov, el cual permite pronosticar resultados más precisos, o también el método probabilístico de Weibull.

2.3.4.2 Basado en Modelos Analíticos

El modelo analítico se refiere a una comprensión de las técnicas que ayudan a estimaciones de confiabilidad del modelo basado en errores físicos, atribuido por la física de las fallas, donde la idea de determinar una posible falla debido a un error físico sucedido en el historial del componente.

Los modelos analíticos requieren de la combinación de experimentos, observación, geometría, y datos del monitoreo de condición para lograr estimar cualquier daño en un específica falla del mecanismo.

2.3.4.3 Modelo Basado en conocimiento

El enfoque basado en el conocimiento se refiere a la recopilación de información almacenada de expertos en la materia y a la interpretación de normas establecidas, además de conocimiento adquirido gracias a la práctica día a día.

2.3.5 Pasos recomendados para aplicar el método de PHM

Los autores Vogl, Weiss y Helu (2016), hacen referencia a los pasos que se deben de realizar para aplicar de manera correcta el método de mantenimiento basado en PHM, se va a explicar mediante la Figura 2.4

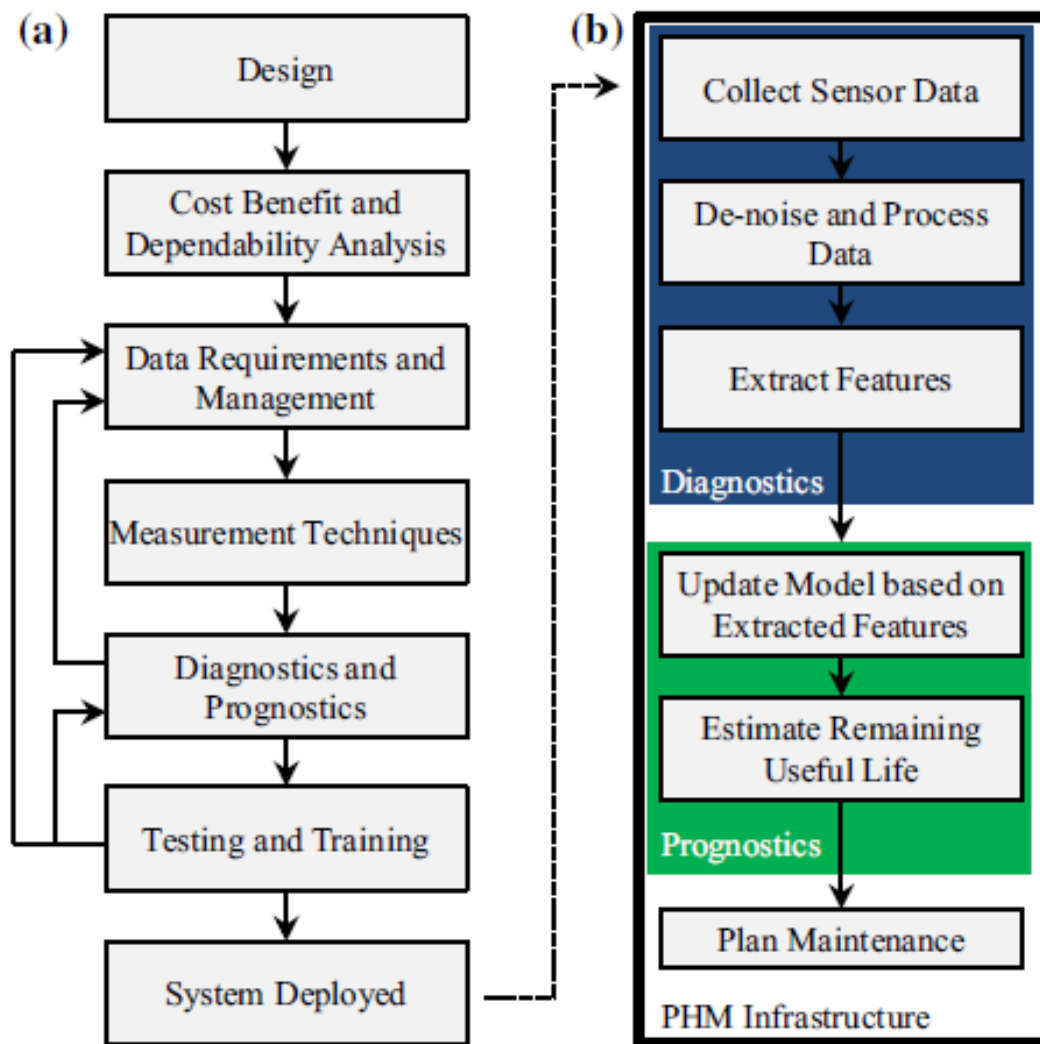


Figura 2.4 Pasos sugeridos para una correcta implementación de PHM

Fuente: (Vogl, Weiss, & Helu, 2016)

Donde los autores sugieren que se inicie con el diseño de las bases necesarias para aplicar el modelo de mantenimiento, luego se indica que se comience con un análisis del costo y de confiabilidad de los componentes a analizar, es decir, que equipos y sus sistemas son más críticos para la empresa.

El siguiente paso es determinar las variables físicas que se quiere medir, después de saber que se quiere medir se comienza a coleccionar datos, procesarlos, analizarlos y archivarlos, con el fin en el siguiente paso diagnosticar y/o pronosticar una posible falla, y con el fin de cumplir las metas deseadas.

Luego como se puede ver en la Figura 2.4 se comienza a dar un proceso iterativo, para la verificación y validación del sistema de datos antes de la implementación final del sistema.

En la imagen se puede observar los pasos necesarios que se realizan cuando se aplica el diagnóstico y pronóstico, donde para el primero es necesario tener sensores que recolecten información, luego procesar los datos y al final extraer información importante y con esto dar paso al pronóstico, aquí se procesan los datos o información obtenida en el diagnóstico, y con estos datos y mediante métodos probabilísticos determinar la vida de un componente de una máquina, y al final del proceso de PHM es crear una correcta rutina de mantenimiento con su respectivo plan.

2.3.6 Beneficios

Según (Guillén, Crespo, Gómez, & Guerrero, 2014) al aplicar el modelo de PHM se logra obtener beneficios en aumentar la confiabilidad evitando los paros operacionales gracias a la capacidad de detección temprana de fallas reduciendo tiempos de mantenimiento con una mejor calendarización del mismo.

Además, según los autores se logra reducir el costo directo del mantenimiento, ya que se optimiza el uso de cada componente, sólo reemplazando el equipo cuándo el componente ha alcanzado su máximo potencial, por lo tanto, al conocer el estado del equipo se puede planificar de mejor manera los planes del mantenimiento, minimizando los repuestos en bodega, donde desde el ingreso a la misma se comienza a reducir su vida útil.

Los autores mencionan diferentes ventajas como lo son: incremento en la confiabilidad y disponibilidad operacional, reducir las huellas ocasionadas por la logística, maximizar el retorno de la inversión del capital.

En el diseño del sistema se puede mejorar y optimizar el diseño de la forma de recolectar y almacenar información histórica útil con el fin de proveer a un correcto análisis del pronóstico, se debe de tomar en cuenta tareas como: patrones de uso del sistema, condiciones de operación, condiciones ambientales, modo de fallas conocidos, y posibles deficiencias. Sin un correcto diseño del sistema puede consumir muchos recursos de tiempo y dinero.

En procesos de producción, el pronóstico es una herramienta muy poderosa para los controles de calidad en los procesos. El monitoreo y pronóstico del estado del equipo de manufactura puede proveer más información del equipo que en sí cualquier proceso de control tradicional de calidad, promoviendo procesos de control y mejora de calidad.

Respecto a los beneficios en soporte logística y mantenimiento, pronóstico crea una base de mantenimiento preventivo y predictivo más poderosa que los métodos tradicionales, y como resultado de esto es minimizar el mantenimiento no calendarizado, eliminar inspecciones redundantes, reducir el mantenimiento calendarizado que se realiza regularmente, ayudar a comprobar la eficiencia de mantenimiento en la empresa y el objetivo-final-es-reducir-los-costos-generados-por-mantenimiento.

Mediante el pronóstico se puede satisfacer los retos de una sociedad moderna para las empresas que producen, los cuales son: ahorro de energía, reducción de emisiones de contaminantes y un entorno verde, buscando un equilibrio entre los recursos que se producen y los que se utilizan.

El uso del pronóstico proporciona oportunidad de evitar costos por inspecciones irregulares de los equipos, y también en reducir reemplazos de componentes que aún poseen una vida útil restante, y que muchas veces son cambiados cuando se puede aprovechar más tiempo.

Según (Guillén, Crespo, Gómez, & Guerrero, 2014) es muy probable que una inversión del método sea muy positiva en cualquier empresa, donde el ROI (retorno de inversión) sea positivo para obtener ganancias.

2.4 Criticidad de equipos

El fin de determinar equipo crítico es realizar un tipo de filtro con el objetivo de proyectar necesidades según la criticidad del equipo para la empresa.

“No todos los equipos tienen la misma importancia en una planta industrial. Es un hecho que unos equipos son más importantes que otros. Como los recursos de una empresa para mantener una planta son limitados, debemos destinar la mayor parte de los recursos a los equipos más importantes, dejando una pequeña porción del reparto a los equipos que menos pueden influir en los resultados de la empresa.” (Duffua, Raouf, & Dixon, 2002)

Se puede leer en la cita anterior cómo es necesario determinar cuáles equipos son más importantes para la empresa, ya que con esto se puede destinar mayor cantidad de recursos, porque son los que generan más y son necesarios, o bien representan un peligro para la salud. Por lo tanto, una forma para poder realizar esta selección de equipo crítico es mediante una tabla de criticidad, donde se pueda tomar en cuenta factores como contaminación ambiental, riesgo a la seguridad de los miembros de la empresa y la infraestructura, paro en la producción total de la compañía o solamente de una línea, con esto se logra no sólo pensar en producción, sino que en otros aspectos importantes que pueden afectar a la compañía y sus integrantes.

A continuación se muestra la propuesta de tabla de criticidad para determinar el equipo crítico del Departamento de Facilidades de la compañía.

Tabla 2.1 Propuesta de tabla de criticidad

Criterios de evaluación		Definición
A	Impacto en la seguridad	Medida en que una falla provoca la exposición a riesgos en salud e higiene ocupacional, tanto a los colaboradores como a la comunidad.
B	Impacto al medio ambiente	Medida en que una falla produce emanaciones de gases, partículas en suspensión, derrames químicos, contaminación de todo tipo de aguas y a la tierra.
C	Impacto a la producción total	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total de la planta de producción.
D	Impacto a la producción de línea	Medida en que su falla provoca el riesgo de un paro total a la línea específica de producción donde se encuentra este equipo o instalación.
E	Impacto a la integridad de otros equipos	Medida en que, por su inadecuada operación repercute en daños a otros equipos.
F	Impacto en la calidad	Provoca una alteración directa en la calidad de los procesos productivos, no cumpliéndose los parámetros de calidad establecidos.
G	Valor económico	Precio de la máquina
H	Dificultad de adquisición	Su disponibilidad de repuestos no es inmediata y la importación del equipo o instalación requiere de un tiempo prolongado.

Fuente: Administración de Mantenimiento I TEC (2015)

Luego, cada uno de los parámetros anteriores se va a evaluar mediante la siguiente tabla, donde el rango de evaluación se va de 0 a 3.

Tabla 2.2 Calificación de los criterios de evaluación

Escala de calificación para los criterios de evaluación	
0	Nada importante
1	Poco importante
2	Importante
3	Muy importante
Clasificación	Puntaje total
Crítico	Igual o mayor que 15
No crítico	Menor que 15

Fuente: Administración de Mantenimiento I, TEC (2015)

2.5 Indicadores de Mantenimiento

Dentro de toda empresa se debe tener indicadores que le permitan al empresario o al respectivo encargado de un sector, determinar en qué estado se encuentra la producción y los equipos. Una de las definiciones formales presentadas para estos indicadores es que son instrumentos que miden la eficacia de un proceso o de un sistema, comparándolo con un valor determinado. Además, se dice que lo que no se mide no se controla, por ello es de suma importancia tener datos que respalden cómo se desenvuelven los procesos dentro de la empresa.

Los indicadores también poseen una alta relevancia dentro de la empresa ya que estos pueden ser vistos como alertas tempranas de futuros problemas en determinada cantidad de máquinas o de una en específico. Se tiene que los indicadores más conocidos con confiabilidad y disponibilidad, los cuáles se explican a continuación:

- Confiabilidad: Este indicador representa la confianza que se tiene hacia un equipo, es decir, la probabilidad de que este funcione con normalidad en un tiempo específico.
- Disponibilidad: Este involucra equipos que recibieron mantenimiento y determina la probabilidad de que ese equipo cumpla con su función luego de una actividad de mantenimiento recibida.

Con respecto a estos indicadores se establecen cálculos estadísticos con los que se puede pronosticar y predecir fallas, entre estos se encuentran el tiempo medio entre fallas, tiempo medio entre reparación, confiabilidad y disponibilidad. Además de estos, se encuentran otros tipos de cálculos y datos importantes que se muestran a continuación:

2.5.1 Tiempo medio entre fallas (TMEF)

Se refiere al tiempo real de operación entre la cantidad de fallas, con él determina el tiempo promedio en que se da una falla, mientras más grande sea este número es mejor, ya que indica que el tiempo de operación de las máquinas es mayor, y es lo que se requiere, para determinar este indicador se realiza de la siguiente forma:

$$\text{Tiempo medio entre fallas: } \frac{\text{Tiempo real de operación de la máquina(horas)}}{\# \text{ Paros de la máquina}}$$

A continuación se muestra la propuesta de cómo calcular el tiempo medio entre fallas, en la siguiente tabla se establece una guía de cómo calcular este indicador:

Tabla 2.3: Tabla guía para el cálculo del tiempo medio entre falla

	Por cada mes, Ejemplo: del 1ero al 31 de Marzo		
Máquinas	Tiempo real de operación de las máquinas (horas)	Número de paros	Indicador de paros(horas)
Compresor Ingersoll Rand (60 hp)			

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Word 2013)

Pasos:

- ✓ Tiempo real de operación de las máquinas: este dato indica la cantidad de horas que la máquina se mantiene funcionando en la jornada laboral, este dato se debe de dar en horas.
- ✓ Número de paros: Se debe de contar los paros inesperados en el mes, si no posee paros se debe de contar como cero.
- ✓ Indicador de paros: este se determina mediante la fórmula mostrada anteriormente.

- ✓ Luego al determinar el indicador para cada máquina se debe de obtener el indicador mensual de toda la empresa, es decir:
 - Se debe de sumar el tiempo real de todas las máquinas
 - Sumar el número de paros de todas las máquinas
- ✓ Luego determinar el indicador mensual de la siguiente forma:

Tiempo medio entre fallas mensual: $\frac{\text{Tiempo real de operación de todas las máquinas por mes(horas)}}{\# \text{ Paros de todas las máquinas}}$

Con la ayuda de los indicadores a nivel anual se puede llegar a fijar metas, con estas se pretende identificar si existen mejoras en el plan mantenimiento o bien si se debe de mejorarlo

2.5.2 Tiempo medio de reparación (MTTR)

Se refiere al tiempo total de reparación entre la cantidad de fallas, con este se determina el tiempo promedio para reparar una falla, mientras más pequeño sea este número es mejor, ya que indica que el tiempo en que se repara el equipo, la idea es que conforme se aplique administración de mantenimiento este indicador sea más pequeño, para determinarlo se realiza de la siguiente manera:

Tiempo medio de reparación: $\frac{\text{Tiempo total de reparación (horas)}}{\# \text{ Paros de la máquina}}$

A continuación se muestra la propuesta de cómo calcular el tiempo medio de reparación en la siguiente tabla se establece una guía de cómo calcular este indicador:

Tabla 2.4: Tabla guía para el cálculo del tiempo medio entre reparación

	Por cada mes, Ejemplo: del 1ero al 31 de Marzo		
Máquinas	Tiempo de paro (horas)	Número de paros	Indicador de paros(horas)
Compresor Ingersoll Rand (60 hp)			

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Word 2013)

Pasos:

- ✓ Tiempo de paro de una máquina: este dato indica la cantidad de horas que se detiene la máquina para poder repararla, se toma en cuenta desde el momento que se desconecta hasta el tiempo que se pone a prueba para verificar su correcto funcionamiento.
- ✓ Número de paros: Se debe de contar los paros en el mes, si no posee paros se debe de contar como cero.
- ✓ Indicador de paros: este se determina mediante la fórmula mostrada anteriormente de tiempo medio de reparación.
- ✓ Luego al determinar el indicador para cada máquina se debe de obtener el indicador mensual de toda la empresa, es decir:
 - Se debe de sumar el tiempo de paro de todas las máquinas
 - Sumar el número de paros de todas las máquinas
- ✓ Luego determinar el indicador mensual de la siguiente forma:

Tiempo medio de reparación mensual:
$$\frac{\text{Tiempo de paro de todas las máquinas por mes(horas)}}{\# \text{ Paros de todas las máquinas}}$$

Mediante este dato puede tener un claro conocimiento de cómo con la ayuda del plan de mantenimiento en las máquinas de la empresa se puede observar como hay mejoras y cuando no.

Además también se debe de calcular anualmente, con el fin de establecer una meta, y cada año continuar la mejora de la misma.

2.5.3 Disponibilidad

Se refiere a la probabilidad de que un sistema o máquina se encuentre operando cuando se requiera su uso, cuanto mayor sea este número indica que la máquina tiene mayor disponibilidad en usarse cuando se requiera.

Este se determina de la siguiente forma:

$$\text{Disponibilidad: } \frac{\text{Tiempo medio entre fallas}}{(\text{Tiempo medio entre fallas} + \text{Tiempo medio de Reparación})}$$

Esto se realiza para cada máquina, por mes o por año, con el fin de obtener un dato que de una idea clara de la disponibilidad del equipo.

2.5.4 Confiabilidad

Se refiere a la confianza a un equipo para que desarrolle correctamente su función básica en un período definido. Es la probabilidad que el equipo desarrolle efectivamente su función.

$$\text{Confiabilidad: } e^{\frac{-t}{\text{tiempo medio entre fallas}}}$$

Con este indicador se puede determinar cómo la probabilidad de un correcto funcionamiento de la máquina, y cual de todas las máquinas es la que se le tiene la menor confianza en el proceso productivo.

2.6 Modelos probabilísticos en confiabilidad para mantenimiento

Según (Zapata, 2011), existen dos tipos de formas de análisis de confiabilidad, el cualitativo y cuantitativo, donde el primero no se establecen índices numéricos, es más subjetivo, es conocido como “juicio de ingeniería”, como por ejemplo son frases como “por el momento no fallará”, sin tener un valor de alguna variable que lo respalde. En cambio el método cuantitativo, se basa en una valoración más objetiva, se establecen valores numéricos que pueden ser determinísticos o probabilísticos, ejemplo, “el equipo tiene una probabilidad que falle del 95%, debido a los análisis realizado”, aunque este método también posee algo de subjetividad ya que la probabilidad es medida por un juicio de ingeniería.

Además, la confiabilidad se puede determinar según modelos analíticos o por medio de la simulación, el primero se basa en aplicar ecuaciones matemáticas y además se evalúan los índices de confiabilidad por medio de soluciones matemáticas, ejemplos: bloques de Markov, y ecuaciones matemáticas. El segundo método se basa en simular el comportamiento aleatorio del componente o sistema y se evalúan los índices de confiabilidad en forma indirecta por medio de técnicas numéricas, como la Simulación Montecarlo.

Para el proyecto a realizar se va a desarrollar el estudio de la confiabilidad mediante el método analítico, usando ecuaciones matemáticas para determinarlas, utilizando el registro histórico de las fallas de los equipos.

2.6.1 Tipos de modelos de análisis de confiabilidad

A continuación se muestran los modelos que se puede utilizar para determinar la confiabilidad de los equipos y además se puede determinar la tasa de falla del equipo, es decir la probabilidad que falle en cierto tiempo determinado.

En ingeniería en mantenimiento, para lograr validar los modelos matemáticos, es necesario realizar experimentos donde se deba simular la realidad del comportamiento del equipo y sistema, con el fin de medir resultados. Por lo tanto, un experimento puede entenderse como una muestra de la realidad del comportamiento del equipo o sistema, que permite a través de la observación controlada lograr simular un modelo-

Para formular modelos de variables aleatorias, es decir, modelos probabilísticos es necesario hacer experimentos.

2.6.1.1 Método de distribución de Weibull

Según (Zapata, 2011) el uso de la función de distribución de Weibull en los estudios de fiabilidad de componentes se debe principalmente a la gran diversidad de formas que este modelo puede tomar, dependiendo de los valores de los parámetros característicos. Esto nos permite usar en un mismo modelo, independientemente de en qué forma varíe la tasa de fallos del componente estudiado, simplificando en gran medida la tarea de análisis de los resultados.

La ventaja de usar este modelo en lugar de los demás, es que no es necesario realizar análisis de los resultados obtenidos durante el ensayo o toma de datos, ayudando a reducir el tiempo de análisis y disminuir la probabilidad de error, debido a una mala elección del modelo. Al aplicar Weibull, el estudio previo de los datos se reduce únicamente a una inspección visual en busca de posibles datos anómalos que distorsionen-los-resultados.

La función de distribución de Weibull es un modelo estadístico que representa la probabilidad de fallo después de un tiempo, en función del tiempo transcurrido o de una variable análoga. O dicho de otra manera, $R(t)$ es la probabilidad de que los componentes de un conjunto sobrevivan hasta el momento t .

Según (Romero, 2012) la distribución de Weibull es una distribución continua y tri-paramétrica, es decir, está completamente definida por tres parámetros y la más empleada en el campo de la confiabilidad.

Los parámetros que se utilizan son los siguientes:

α (alpha) es el parámetro de escala o vida característica. Este parámetro representa el tiempo para el cual la probabilidad de fallo acumulada es de 63,2 %. Por tanto cuando mayor sea este valor, mayor será el intervalo de tiempo en que se producirán los fallos.

γ (gamma) es el parámetro de translación, se usa cuando inicialmente, durante un T , no se producen fallos y a partir de ese instante la fiabilidad del producto se puede aproximar por la distribución de Weibull (caso $\gamma > 0$); o cuando hay fallos antes de empezar los ensayos (caso $\gamma < 0$).

β es el parámetro de forma o perfil y determina la forma de distribución. En la representación gráfica del modelo, este parámetro coincide con la pendiente de la recta y da una idea de la dispersión de la muestra.

A partir de $R(t)$ se puede definir la probabilidad de que un componente falle antes del momento t , que se indica como $F(t)$. Esta función es muy útil en el estudio de fiabilidad de componentes y se puede representar como:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

A continuación se muestra los parámetros Según (Park, 2001) para una correcta distribución de Weibull, que son los valores que se usan para el análisis de los componentes.

$$F(t) = 1 - e^{\left(\frac{-t}{\eta}\right)^\beta}$$

Donde:

$F(t)$: Probabilidad de falla de un componente

t : tiempo de falla

η : Característica de vida parámetro escala

β : parámetro forma o pendiente

e : base logaritmo natural

Mediante un modelo de parametrización se obtienen los valores de β y η .

Para aplicaciones prácticas del método, primero se debe de obtener n cantidad de observaciones de tiempos de vida o tiempos sin fallas experimentalmente, luego se debe de estimar la función densidad, la cual posee dos estimaciones:

1. Cuando se estiman la función de distribución con el método de rangos medianos si la población es pequeña.

$$F(i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4}$$

2. Por el método de rangos medios:

$$F(i) = \frac{i}{n + i}$$

Al final se debe de tabular los datos (t_i , $F(i)$).

Ejemplo de aplicación del método:

A continuación se muestra un ejemplo de cómo utilizar este método.

Se realiza mantenimiento preventivo a una fotocopiadora donde el mismo técnico ha realizado el trabajo, la idea es determinar cuál es el tiempo más aproximado para terminar la actividad y así poseer un rango de tiempos más formales para programarla y comunicar a las personas un tiempo preciso, además, se va a calcular la probabilidad de falla en un tiempo determinado.

No Orden (i)	Tiempos	Funcion Empirica $F(i) = (i-0.3)/(n+0.4)$	GRAFICAR			
			Ordenadas (eje Y)		Abcisas (eje X)	
			Exp.	Weibull	Exp.	Weibull
			$-\ln[1-F(i)]$	$\ln[\ln(1/(1-F(i)))]$	t	$\ln(t)$
1	54	0.0673	0.0697	-2.6638	54	3.9890
2	55	0.1635	0.1785	-1.7233	55	4.0073
3	57	0.2596	0.3006	-1.2020	57	4.0431
4	62	0.3558	0.4397	-0.8217	62	4.1271
5	63	0.4519	0.6013	-0.5086	63	4.1431
6	66	0.5481	0.7942	-0.2304	66	4.1897
7	70	0.6442	1.0335	0.0329	70	4.2485
8	71	0.7404	1.3486	0.2990	71	4.2627
9	73	0.8365	1.8112	0.5940	73	4.2905
10	76	0.9327	2.6985	0.9927	76	4.3307

Figura 2.5 Datos utilizados para el modelo de Weibull
Fuente: (Catalán, 2007)

Luego de determinar los valores de los “x” y “y” se grafica mediante el programa de Minitab 2016 para obtener la ecuación de regresión lineal.

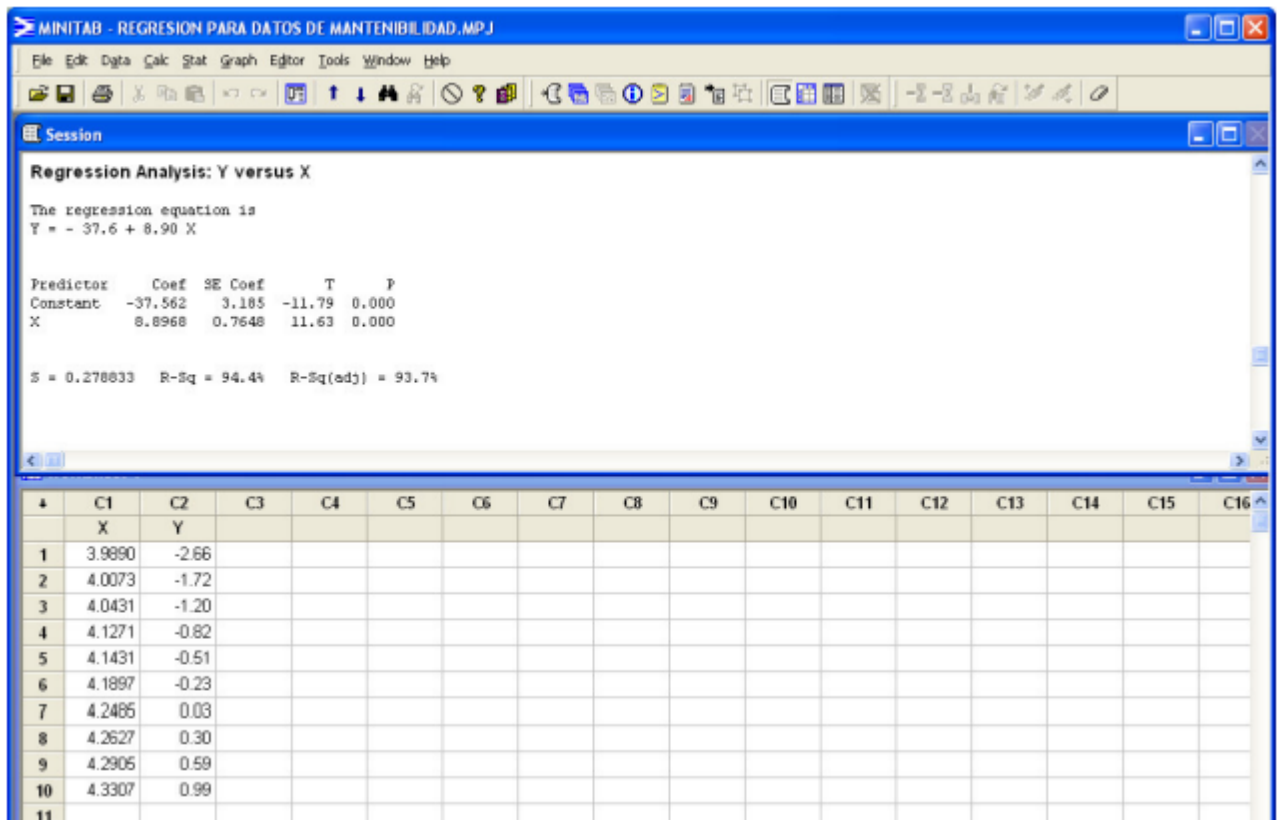


Figura 2.6 Datos para obtener la ecuación de regresión lineal

Fuente: (Catalán, 2007)

Por lo tanto la ecuación de la recta es de:

$$y = 8,9x - 37,6$$

Donde se según la regresión lineal se obtiene que:

$$y = \beta x + Y_0$$

Y α es igual a:

$$\alpha = e^{-\frac{Y_0}{\beta}}$$

Por lo tanto, en el ejemplo los valores de beta y alpha son:

$$\beta = 8,9$$

$$\alpha = 68,35$$

Con esos valores se puede calcular la probabilidad de que el mantenimiento esté listo en un tiempo determinado como se muestra a continuación:

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{68,53}\right)^{8,9}}$$

La probabilidad de que el sistema este listo en 70 minutos se calcula evaluando la función de mantenibilidad para un t=70 minutos.

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{70}{68,53}\right)^{8,9}} = 0,71 = 71\%$$

Es decir, la probabilidad de que el equipo esté finalizado en 70 minutos es de un 71%

Además, también se puede calcular el tiempo promedio en el que se debe de terminar el mantenimiento, ya sea mediante un promedio lineal, o mediante la ecuación de tiempo medio entre reparación, que utiliza la función gamma.

$$MTTR = 68,35\Gamma\left(1 + \frac{1}{8,9}\right)$$

Donde mediante el programa de Excel 2015 se puede determinar la función gamma, la cual se obtiene como resultado:

$$MTTR = 68,35 \times (0,95) = 64,69 \text{ minutos}$$

Obteniendo que el tiempo promedio del mantenimiento preventivo es de 64,69 minutos.

Es importante mencionar que el ejemplo anterior se utilizó el método de Weibull para analizar los tiempos de duración del plan de mantenimiento preventivo, pero también el procedimiento de Weibull se utiliza cuando se quiere establecer la probabilidad de falla y tiempo de cambio de un componente, donde es muy frecuente que se utilice los siguientes rangos para clasificar la falla según (Murillo, 2017):

Sí $\beta < 1$, implica Mortalidad Infantil: los equipos electrónicos y mecánicos pueden iniciar con un alto rango de fallas en el inicio de proyectos y nuevos diseños, otros modos de falla son:

- Problemas de producción
- Problemas de control de calidad
- Problemas de overhauls (reparación completa)
- Fallas de componentes eléctricos

Si $\beta = 1$, implica Falla Aleatoria: falla independiente del tiempo o aleatorias y es igual a una distribución exponencial.

- Errores de mantenimiento como los humanos
- Fallas debido a naturaleza, daños u objetos desconocidos como ratos.
- Reparaciones-no-apropiadas,-es-decir,-sin-ninguna-razón.

Si $1 < \beta < 4$, implica falla por deterioro temprano: Estas son muchas fallas de modo mecánicos en esta clase:

- Bajo ciclo de fatiga
- Corrosión
- Erosión

Si $\beta > 4$, implica deterioro rápido por edad de uso, típicos modos de fallas con edades muy viejas y rápido salida por uso:

- Corrosión por esfuerzos
- Propiedades de los materiales
- Materiales como cerámicas

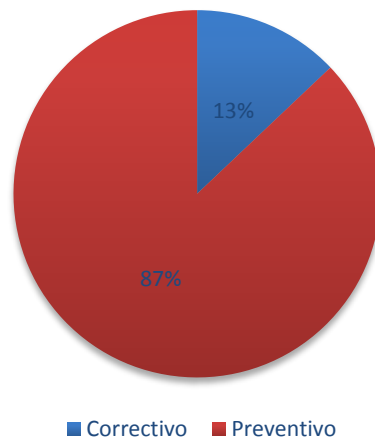
3 Capítulo 3: Estado actual del mantenimiento del Departamento de Facilidades

3.1 Historiales de mantenimiento

A continuación se muestran los historiales de mantenimiento de los que se tiene registro desde octubre del 2014 (aún no había iniciado operaciones la empresa) hasta Febrero del 2017, luego de esta fecha se comenzó a desarrollar el proyecto.

3.1.1 Correctivo

Según el historial que se posee en el Departamento de Facilidades sólo un 13% del total de órdenes de trabajo corresponde a mantenimiento correctivo, el otro 87% son de mantenimiento preventivo, como se observa en el Gráfica 3.1 Gráfica 3.1 Mantenimiento Correctivo versus el Preventivo. Existen pocas órdenes de trabajo correctivas ya que la empresa no posee más de 3 años de funcionamiento, además se invierte en realizar preventivo, donde se puede observar que se tienen resultados positivos.



Gráfica 3.1 Mantenimiento Correctivo versus el Preventivo
Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Excel 2013)

3.2 Estado actual del mantenimiento en la empresa

Actualmente, el departamento de mantenimiento se puede catalogar como descentralizado, ya que existe un departamento, sino que tanto Producción como Facilidades se hacen cargo de sus equipos. Se va a explicar cómo está formado el Departamento de Facilidades, ya que es el sector donde se está desarrollando el proyecto.

En la actualidad, Facilidades cuenta solamente con tres integrantes los cuales son: el Gerente de Facilidades, y dos técnicos, donde estos últimos se separan entre los turnos I (6am a 2pm) y II (2pm a 10pm).

La idea es contratar un albañil o una mano de obra menos calificada que se encargue del mantenimiento del edificio, tanto la parte externa como la interna, ya que en muchas ocasiones se desaprovecha el conocimiento de los técnicos en actividades como la rutina visual diaria o semanal del estado del edificio. Con eso se lograría evitar subcontratar gran parte del mantenimiento que se realiza en las máquinas de facilidades.

Es importante destacar que no se posee ningún software de mantenimiento, por lo tanto todo los historiales se realizan mediante Microsoft Excel; la idea es implementar tipos de software que se usen en casa matriz (Alemania), pero hasta el momento no lo han realizado.

3.2.1 Preventivo

Del total de órdenes de trabajo que se realizan en el Departamento de Facilidades el 87% corresponden a trabajos preventivos, donde la mayoría corresponde a seguir el plan de mantenimiento que sugiere el proveedor para mantener la garantía del equipo, por lo tanto, es posible que se esté haciendo sobre mantenimiento, o bien realizando actividades que se pueden alargar un poco más de tiempo, y disminuir frecuencias.

3.2.2 Predictivo

Este tipo de mantenimiento no se ha registrado en las órdenes de trabajo, pero la única actividad predictiva que se realiza es medir corrientes, voltaje y potencia en los ventiladores de extracción de los hornos de las líneas de SMT. La idea del proyecto es comenzar a implementar un poco más este tipo de mantenimiento, e ir creando la necesidad de realizarlo. Además, cada vez que se realiza en mantenimiento del compresor se procede a realizar análisis de aceite.

3.2.3 Paros inesperado

Según el historial del mantenimiento del equipo de facilidades sólo se han detectado tres paros inesperados, uno en el compresor, donde una de las válvulas falló, pero no afectó producción ya que fue cuando la empresa iba iniciando, por lo tanto, aún no estaba corriendo producto en la líneas de producción, entonces el impacto fue casi nulo, además el equipo e instalación estaba en garantía, por lo tanto, el costo de reparación fue cargado a la empresa encargada de la instalación.

El segundo paro generado es en una de las bombas de vacío, no es tan importante ya que poseen tres bombas, dos de ellas pueden suministrar la carga, y la otra es de respaldo, pero igual, es importante mantener las 3 bombas en uso constante.

3.3 Codificación

Se propone la codificación de los equipos del Departamento de Facilidades con el objetivo de poseer un control de cada equipo cuando se requiere tomar datos de indicadores, realizar órdenes de trabajo, diferenciar los equipos que son de iguales características.

La codificación se va a realizar en áreas según donde estén ubicados los equipos, y siguiendo el nombre de las áreas que ya poseen definidas por la empresa. Se va a usar la siguiente estructura:

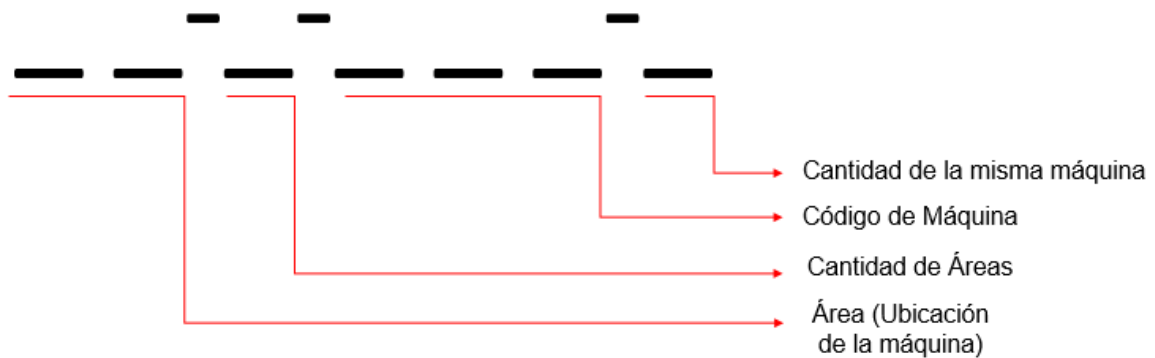


Figura 3.1 Estructura de codificación
Fuente: Elaboración Propia (Power Point 2013)

A continuación se va a mostrar los equipos de Facilidades.

3.4 Equipo de Facilidades

A continuación se muestran los equipos que están a cargo del Departamento de Facilidades, a los cuales se les calificó dependiendo del espacio físico que ocupan en la compañía.

Tabla 3.1 Lista de equipos del departamento de facilidades de Zollner Costa Rica

Lista de equipos			
Zollner Electroniks			
Planta: Lima, Cartago Costa Rica			
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Área	Equipo	Sistema	Codificación
Cuarto Eléctrico	Panel Eléctrico 1 (277/480 V) 200 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-1
	Panel Eléctrico 2 (277/480 V) 100 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-2
	Panel Eléctrico 3 (120/208 V) 150 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-3
	Panel Eléctrico 4 (120/208) 100 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-4
	Panel Eléctrico 5 (230/400 V) 200 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-5
	Panel Eléctrico 6 (230/400 V) 200 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-6
	Panel Eléctrico 7 (230/400 V) 1000 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-7
	Panel Eléctrico 8 (277/480 V) 600 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-8
	Panel Eléctrico 9 (120/208 V) 500 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-9
	Panel Eléctrico 10 (277 V) 50 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-10
	Panel Eléctrico 11 (277 V) 20 A	Sistema Eléctrico	CE-1-PEL-11
	Transformador Principal 34,5 kV, 750 kVA	Sistema Eléctrico	CE-1-TPR-1
	Transformador secundario 480-120 V, 150 kVA	Sistema Eléctrico	CE-1-TSE-1
	Transformador secundario 480-230/400 V 150 KVA	Sistema Eléctrico	CE-1-TSE-2
	UPS Lithonia Lighting	Sistema Eléctrico	CE-1-UPS-1
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Área	Equipo	Sistema	Codificación
Cuarto Mecánico	Compresor de Tornillo 60 hp	Sistema Hidráulico	CM-1-COM-1
		Sistema Eléctrico	
		Sistema Mecánico	
	Secador de Aire 3 hp	Sistema Hidráulico	CM-1-SDA-1
		Sistema Eléctrico	
		Sistema Mecánico	
	Bomba de Vacío 10 hp (1)	Sistema Eléctrico	CM-1-BDV-1
		Sistema Mecánico	
	Bomba de Vacío 10 hp (2)	Sistema Eléctrico	CM-1-BDV-2
		Sistema Mecánico	
Bomba de Vacío 10 hp (3)	Sistema Eléctrico	CM-1-BDV-3	
	Sistema Mecánico		
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Área	Equipo	Sistema	Codificación

Cuarto Hidráulico	Bomba de Alimentación de agua 2 hp (1)	Sistema Eléctrico	CH-1-BDA-1
		Sistema Mecánico	
	Bomba de Alimentación de agua 2 hp (2)	Sistema Eléctrico	CH-1-BDA-2
		Sistema Mecánico	
	Sistema contra incendios	Sistema Eléctrico	
		Sistema Mecánico	
Bomba de Pozo Profundo 1,5 hp	Sistema Eléctrico	CH-1-BDP-1	
	Sistema Mecánico		
Panel Eléctrico control bombas de agua (208 V) 30 A	Sistema Eléctrico	CH-1-PEL-1	
Panel Eléctrico control bomba contra incendio 120 V) 20 A	Sistema Eléctrico	CH-1-PEL-2	
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Área	Equipo	Sistema	Codificación
Aire Acondicionado	Unidad Condensadora Cuarto de Coating	Sistema Eléctrico	
		Sistema Mecánico	
	Unidad Condensadora (1)	Sistema Eléctrico	AC-1-UCO-1
		Sistema Mecánico	
	Unidad Condensadora (2)	Sistema Eléctrico	AC-1-UCO-2
		Sistema Mecánico	
	Unidad Condensadora (3)	Sistema Eléctrico	AC-1-UCO-3
		Sistema Mecánico	
	Chiller 1 (5 Toneladas refrigerativas)	Sistema Eléctrico	AC-1-CHI-1
	Chiller 2 (5 Toneladas refrigerativas)	Sistema Eléctrico	AC-1-CHI-2
	Chiller 3 (5 Toneladas refrigerativas)	Sistema Eléctrico	AC-1-CHI-3
	Paquete de Aire Acondicionado 50 Ton (1)	Sistema Eléctrico	AC-1-PDA-1
		Sistema Mecánico	
	Paquete de Aire Acondicionado 50 Ton (2)	Sistema Eléctrico	AC-1-PDA-2
Sistema Mecánico			
Paquete de Aire Acondicionado 50 Ton (3)	Sistema Eléctrico	AC-1-PDA-3	
	Sistema Mecánico		
Paquete de Aire Acondicionado 50 Ton (4)	Sistema Eléctrico	AC-1-PDA-4	
	Sistema Mecánico		
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Área	Equipo	Sistema	Codificación
Producción	Distribución de Nitrógeno Líquido	Sistema Mecánico	PR-1-DNL-1
	Ventilador Coating 1	Sistema Mecánico	PR-1-VEC-1
		Sistema Eléctrico	
Ventilador Coating 2	Sistema Mecánico	PR-1-VEC-2	

		Sistema Eléctrico	
	Ventilador Coating 3	Sistema Mecánico	PR-1-VEC-3
		Sistema Eléctrico	
	Ventilador de extracción wave solder	Sistema Mecánico	PR-1-VEW-1
		Sistema Eléctrico	
	Ventilador de extracción ecoselect	Sistema Mecánico	PR-1-VEE-1
		Sistema Eléctrico	
	Ventilador de extracción del cuarto Químico	Sistema Mecánico	PR-1-VEQ-1
		Sistema Eléctrico	
	Ventilador de extracción del cuarto Químico 2	Sistema Mecánico	PR-1-VEQ-2
		Sistema Eléctrico	
	Kardex 1 (bodegas verticales)	Sistema Mecánico	PR-1-KAR-1
		Sistema Eléctrico	
	Kardex 2 (bodegas verticales)	Sistema Mecánico	PR-1-KAR-2
		Sistema Eléctrico	
	UPS	Sistema Eléctrico	PR-1-UPS-1
	Panel Eléctrico 1 (277/480 V) 800 A 3F 4H	Sistema Eléctrico	PR-1-PEL-1
	Panel Eléctrico 2 (120/208 V) 800 A 3F 4H	Sistema Eléctrico	PR-1-PEL-2
	Panel Eléctrico 3 (230/400 V) 100 A 3F 4H	Sistema Eléctrico	PR-1-PEL-3
	Panel Eléctrico 4 (277/480 V) 100 A 3F 4H	Sistema Eléctrico	PR-1-PEL-4
	Panel Eléctrico 5 (277/480 V) 700 A 3F 4H	Sistema Eléctrico	PR-1-PEL-5
	Panel Eléctrico 6 (120/208 V) 100 A 3F 4H	Sistema Eléctrico	PR-1-PEL-6
	Panel Eléctrico 7 (230/400 V) 50 A 3F 4H	Sistema Eléctrico	PR-1-PEL-7
	Transformador secundario 480 V-120/208 3F 4H 225 kVA	Sistema Eléctrico	PR-1-TSE-1
	Transformador secundario 208-230/400 3F 4H 15 KVA	Sistema Eléctrico	PR-1-TSE-2
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Área	Equipo	Sistema	Codificación
Cuarto Servidores	UPS 1	Sistema Eléctrico	CS-1-UPS-1
	UPS 2	Sistema Eléctrico	CS-1-UPS-2
	UPS 3	Sistema Eléctrico	CS-1-UPS-3

Fuente: Elaboración propia (Excel 2013)

3.5 Equipo Crítico

3.6 A continuación se muestra la tabla de criticidad desarrollada para determinar el equipo crítico en la empresa, donde se usó la tabla dada en el capítulo del marco teórico.

3.7 Tabla 3.2 Criticidad de Equipos de Facilidades

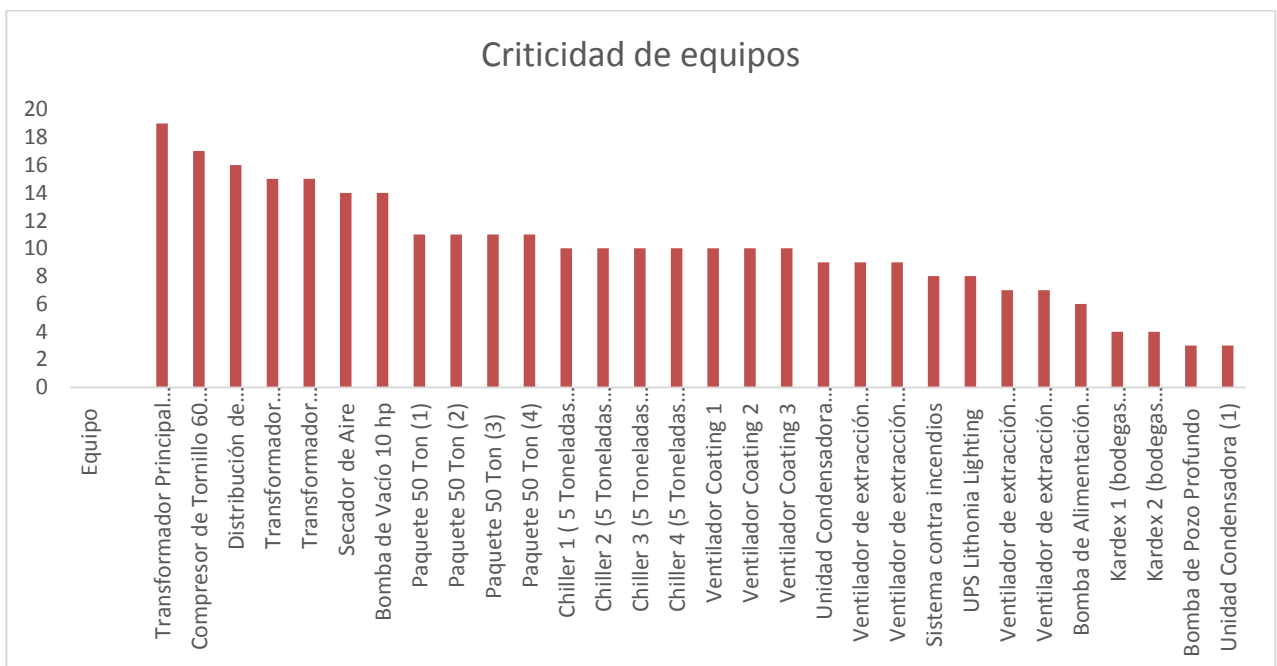
Equipo	Factores								TOTAL
	A	B	C	D	E	F	G	H	
Transformador Principal 34,5 kV, 750 kVA	3	1	3	3	3	0	3	3	19
Compresor de Tornillo 60 hp	1	0	3	3	2	2	3	3	17
Distribución de Nitrógeno Líquido	3	1	1	3	1	3	3	1	16
Transformador secundario 480-120 V, 180 kVA	3	0	0	3	3	0	3	3	15
Transformador secundario 480-230/400 V	3	0	0	3	3	0	3	3	15
Secador de Aire	1	0	1	1	3	2	3	3	14
Bomba de Vacío 10 hp	1	0	2	3	3	3	1	1	14
Paquete 50 Ton (1)	0	1	0	3	0	3	3	1	11
Paquete 50 Ton (2)	0	1	0	3	0	3	3	1	11
Paquete 50 Ton (3)	0	1	0	3	0	3	3	1	11
Paquete 50 Ton (4)	0	1	0	3	0	3	3	1	11
Chiller 1 (5 Toneladas refrigerativas)	0	1	0	3	0	3	2	1	10
Chiller 2 (5 Toneladas refrigerativas)	0	1	0	3	0	3	2	1	10
Chiller 3 (5 Toneladas refrigerativas)	0	1	0	3	0	3	2	1	10
Chiller 4 (5 Toneladas refrigerativas)	0	1	0	3	0	3	2	1	10
Ventilador Coating 1	0	0	2	3	0	3	1	1	10
Ventilador Coating 2	0	0	2	3	0	3	1	1	10
Ventilador Coating 3	0	0	2	3	0	3	1	1	10
Unidad Condensadora Cuarto de Coating	0	1	0	3	0	3	1	1	9
Ventilador de extracción wave solder	0	0	1	3	0	3	1	1	9
Ventilador de extracción ecoslect	0	0	1	3	0	3	1	1	9
Sistema contra incendios	3	0	0	0	0	0	3	2	8
UPS Lithonia Lighting	0	0	0	0	3	0	2	3	8
Ventilador de extracción del cuarto Químico	0	3	0	0	0	2	1	1	7
Ventilador de extracción del cuarto Químico 2	0	3	0	0	0	2	1	1	7
Bomba de Alimentación de agua	0	0	2	3	0	0	1	0	6
Kardex 1 (bodegas verticales)	0	0	1	0	0	0	2	1	4
Kardex 2 (bodegas verticales)	0	0	1	0	0	0	2	1	4
Bomba de Pozo Profundo	0	0	0	0	0	0	2	1	3
Unidad Condensadora (1)	0	1	0	0	0	0	1	1	3
Unidad Condensadora (2)	0	1	0	0	0	0	1	1	3
Unidad Condensadora (3)	0	1	0	0	0	0	1	1	3

Fuente:-Elaboración-Propia-(Excel,-2013)

3.8 De la

Tabla 3.2 anterior se puede observar que el equipo crítico es el transformador principal de la empresa, pero se puede decir que esta máquina es la más importante en cualquier compañía donde solo exista una acometida principal, por motivos que alimenta todos los equipos de la empresa. Por lo tanto se decide trabajar con el compresor, que junto al transformador principal son lo más críticos para la empresa.

De la tabla anterior de criticidad se puede obtener el siguiente gráfico que representa de mejor manera aquellos equipos que son críticos para la empresa, comenzando por el más crítico y terminando con el menos crítico, según lo analizado.



Gráfica 3.2 Muestra de equipos críticos según la evaluación realizada

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Además, como se puede ver en la Figura 3.2 se realizó un análisis de las necesidades de las máquinas de producción se concluyó que el 92% de todos los equipos utilizan aire comprimido, además, es crítico debido a que sólo existe un equipo en la compañía, y si llegara a fallar no existe un respaldo, y se detendría toda la producción. Este levantamiento de usos de facilidades en producción se realizó en el mes de febrero del 2017.

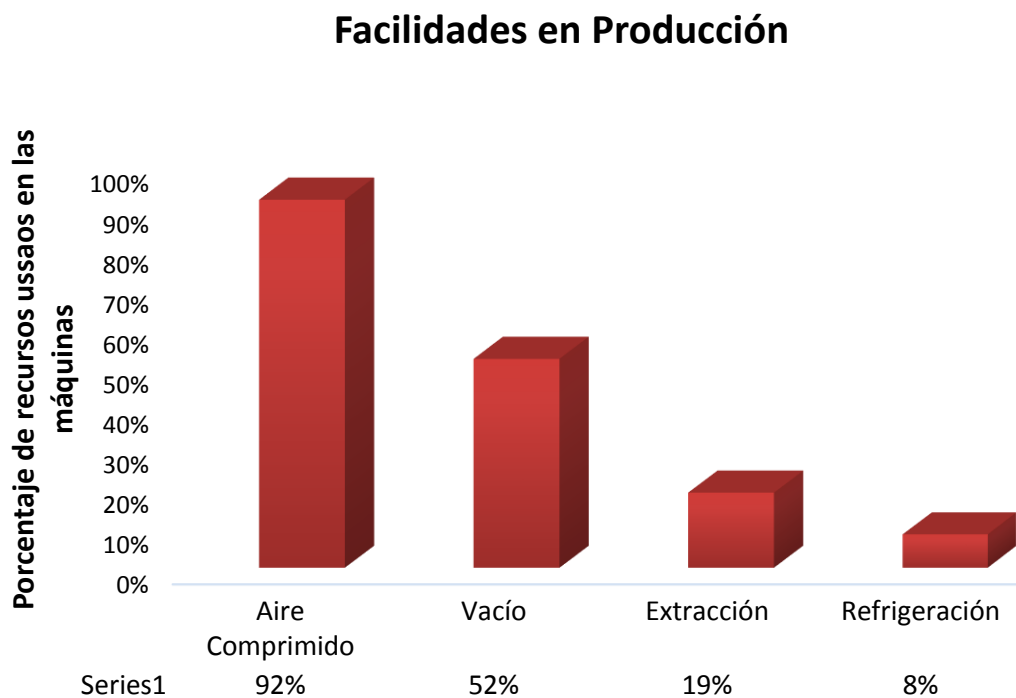
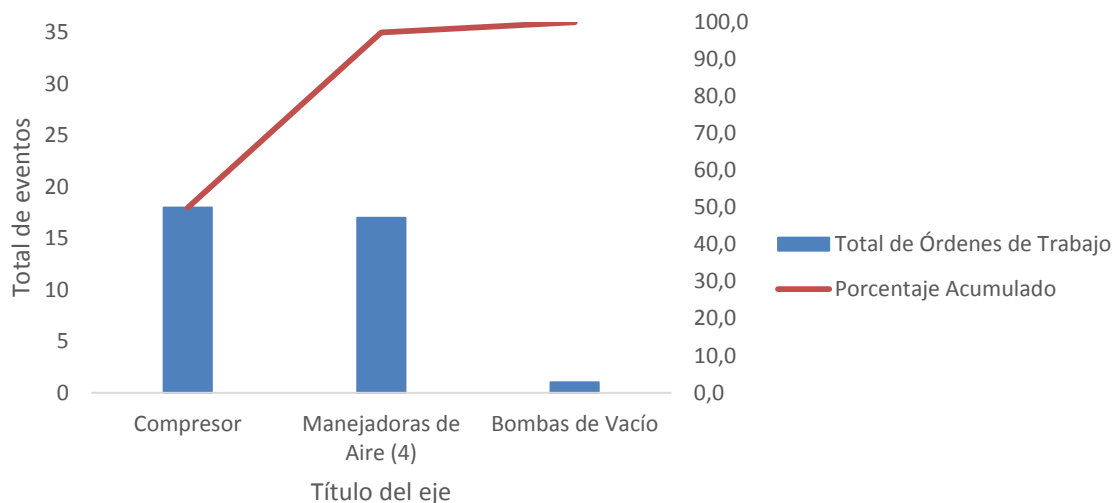


Figura 3.2 Uso de recursos en las máquinas de producción, analizado en Febrero del 2017
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Del historial que posee la empresa se puede determinar sobre los mantenimientos que se han realizado desde que se comenzó a producir, con esos datos se puede crear un diagrama de Pareto de los equipos más críticos no tomando en cuenta los transformadores, obteniendo el siguiente resultado:



Gráfica 3.3 Diagrama de Pareto del historial de Órdenes de trabajo de mantenimiento de noviembre del 2014 a febrero del 2017
Fuente: Elaboración Propia (Excel)

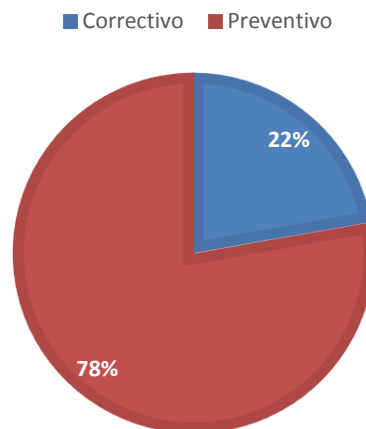
Del diagrama de Pareto anterior se construyó con las tres máquinas críticas sin contar los transformadores, como se estableció en los objetivos específicos al inicio del documento. Se puede observar en la Gráfica 3.3 que el compresor de tornillo es el que ha recibido mayor horas de trabajo dedicado a mantenimiento, por lo tanto se puede deducir que se tiene conciencia que este equipo es el más crítico para la compañía, por eso las horas dedicadas a mantenimiento. Es importante rescatar que se siguió el plan de mantenimiento que aconseja el proveedor ya que si no se realizaba se perdía la garantía del equipo, la cual era de dos años desde que se arrancó el equipo por primera vez.

3.9 Historial del mantenimiento realizado en los equipos críticos

A continuación se muestran los datos que la empresa posee sobre los mantenimientos que se han realizado en el compresor y bombas de vacío. Los datos fueron tomados desde noviembre del 2014 a febrero del 2017. Este historial no es muy completo, ya que no se poseen informes de que acciones se realizan en cada actividad, y tampoco el historial está completo, ya que en ocasiones se realizaba los trabajos para no se guardaba la información.

3.9.1 Historial del mantenimiento del compresor de tornillo Ingersoll Rand de 60 hp

En la Gráfica 3.4 se muestra el total de órdenes de trabajo que se han realizado al compresor desde la fecha que se indicó anteriormente.



Gráfica 3.4 Relación de órdenes de trabajo correctivas con respecto a las preventivas
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Por lo tanto, en total se han realizado dieciocho órdenes de trabajo en el compresor, donde 14 de ellas corresponde al mantenimiento preventivo, y 4 al correctivo. Es un equipo que solamente tiene 3 años de funcionamiento, trabajando 6 días por semana las 24 horas, por esa razón la poca cantidad de acciones correctivas.

Actualmente, la empresa paga por el mantenimiento predictivo del compresor a la compañía que los distribuye en el país la cual es Cummings, ellos generan un plan de mantenimiento con sus respectivos repuestos. El costo del último mantenimiento realizado fue de \$1310, correspondiente al mes de febrero del 2017. A continuación se muestra como se distribuye el costo total de la revisión.

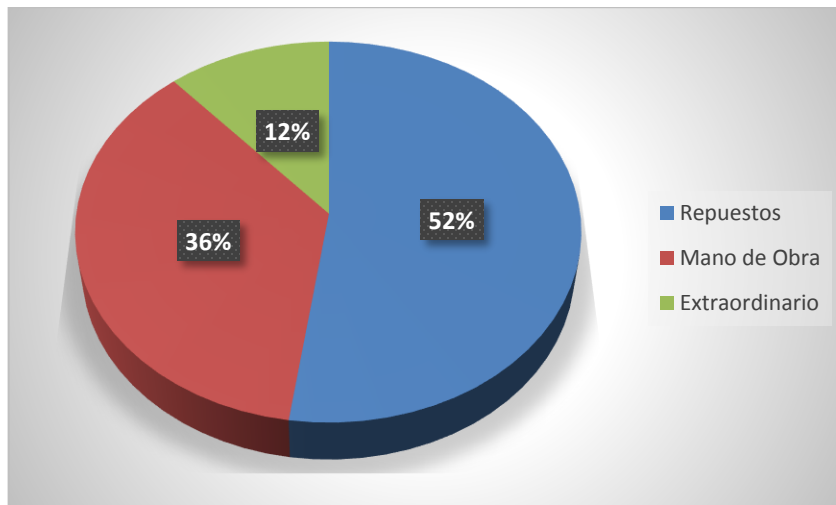


Figura 3.3 Distribución de los costos del mantenimiento realizado al compresor
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Donde en la Figura 9.1 de la sección de Anexos se puede leer el plan de mantenimiento que se contrata, con sus respectivos costos derivados de cada actividad.

Actualmente, el compresor posee 12.000 horas de trabajo continuo, desde noviembre del 2014 a marzo del 2017, donde solamente se ha detenido 16 horas y 45 minutos por algún mantenimiento correctivo según historial dado por el departamento de facilidades. Lo que quiere decir que solamente un 0,14% corresponden a paros de máquinas. Es importante mencionar que se tomó un cambio de seteo de presiones como mantenimiento correctivo, pero en realidad el equipo no falló, sino más bien fue un ajuste de parámetros.

La inversión desde el año 2015 hasta el último mantenimiento realizado el cual corresponde a las 12.000 horas la compañía ha invertido 9.976,44 dólares en solo mantenimiento preventivo. A continuación se muestra la tabla del costo de mantenimiento que se invierte por año en preventivo sólo en el compresor.

Tabla 3.3 Costo de Mantenimiento del compresor 60 hp Ingersoll Rand por año según horas de trabajo

Horas de Trabajo	Costo
2015	
2000 (agosto)	\$1 593,57
4000 (diciembre)	\$1 296,77
2016	
6000 (abril)	\$1 296,77
Ajuste de Parámetros	\$ 125,00
8000 (Agosto)	\$3 098,7
10000 (noviembre)	\$1 335,38
2017	
12000 (enero)	\$1 310,38
Total	\$9 976,44

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

En los siguientes apartados se va analizar cuál es la inversión de ese mantenimiento en cada uno de los sistemas.

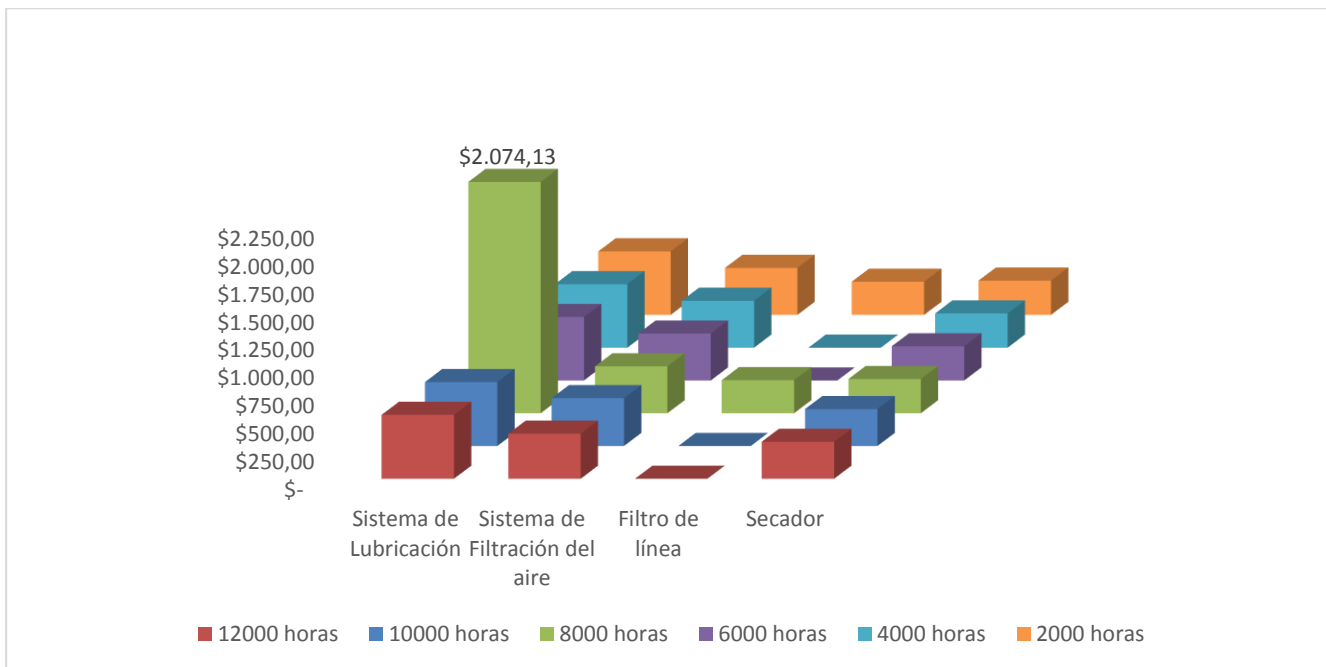
3.9.1.1 Sistemas y componentes del compresor de tornillo 60 hp

A continuación se muestran la inversión que ha realizado la compañía en mantenimiento preventivo por sistema

Tabla 3.4 Costo de mantenimiento del compresor según sistema

Sistemas	2000 horas	4000 horas	6000 horas	8000 horas	10000 horas	12000 horas
Sistema de Lubricación	\$569,13	\$569,13	\$569,13	\$2,074,13	\$573,94	\$573,94
Sistema de Filtración del aire	\$420,77	\$420,77	\$420,77	\$420,77	\$429,57	\$404,57
Filtro de Línea	\$296,8	0	0	\$296,8	0	0
Secador	\$306,87	\$306,87	\$306,87	\$306,87	\$331,87	\$331,87
Total	\$1 593,57	\$1 296,77	\$1 296,77	\$ 3 098,7	\$1 335,38	\$1 310,38

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)



Gráfica 3.5 Comparación entre los costos del mantenimiento según cada sistema

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

En la Gráfica 3.5 se puede observar que la mayor inversión se ha realizado en el sistema de lubricación, donde cada 8000 horas de trabajo se realiza el cambio de aceite, y en cada revisión que se ejecuta se realiza un análisis de aceite, aquí es donde se puede buscar un ahorro, utilizando los datos del análisis de aceite para poder extender por lo menos unos meses el cambio de aceite, esto se lograría observando la viscosidad y propiedades del análisis, ya que si no se observa algún cambio se extender la rutina del cambio de aceite.

3.9.2 Historial de mantenimiento de las bombas de vacío

La compañía subcontrata todo el servicio de mantenimiento de las bombas de vacío, donde según el historial que se posee en el Departamento de Facilidades se poseen 6 mantenimientos preventivos y solo uno correctivo, que hasta el momento no se ha podido reparar la falla, ya que casa matriz de la máquina está buscando una solución más barata..

Como se menciona en el párrafo anterior, una de las bombas está fuera de servicio ya que la bomba succionó partículas muy abrasivas, se llamó al proveedor y ellos se hicieron cargo de revisarla, y dar una solución del problema. La bomba en estos momentos está conectada por si alguna de las otras dos llegara a fallar, es decir, como un respaldo, pero en realidad la recomendación es no utilizarla para evitar que se dañe más. Se está esperando que casa matriz de las bombas den una solución al daño del equipo para repararla y volver a trabajar.

3.9.2.1 Costos del mantenimiento preventivo de las bombas de vacío

A continuación se muestra los costos del mantenimiento contratado para las bombas de vacío, donde el proveedor de la máquina es el encargado del mantenimiento del equipo. La empresa realizó un contrato de mantenimiento, donde se presentan las rutinas que incluye el servicio más su respectivo costo de materiales y mano de obra. Un punto importante es que la compañía que realiza el mantenimiento asegura a Zollner poseer en stock repuestos para las bombas, además, de una respuesta rápida si se posee algún problema.

Tabla 3.5 Costos del Mantenimiento Preventivo de las bombas de vacío

Visitas	Horas	Repuestos	Costo	Cantidad	Total	Mano de Obra	Total por visita+I.V
1	500	Cambio de Aceite	\$11,72	8	\$281,28	\$500,00	\$781,28
2	1500	Cambio de Gast Ballast	\$ 16,05	1	\$48,15	\$500,00	\$829,43
		Cambio de Aceite	\$11,72	8	\$281,28		
3	2000	Cambio de Exhaust Filter	\$691,21	1	\$2 073,63	\$500,00	\$2 573,63
4	3000	Limpieza de Inlet mesh Filter	\$ 0	1	\$ 0	\$500,00	\$829,43
		Cambio de Gast Ballast Filter Element	\$16,05	1	\$48,15		
		Cambio de Aceite	\$11,72	8	\$281,28		
5	4000	Cambio de Exhaust Filter	\$691,21	3	\$2 073,63	\$500,00	\$2 573,63
6	4500	Cambio de Gast Ballast Filter Element	\$16,05	1	\$48,15	\$500,00	\$829,43
		Cambio de Aceite	\$11,72	8	\$281,28		
		Inspección Drive Coupling Elastomer	\$ 0	1	\$ 0		
		Inspección Retaining Ring	\$ 0	1	\$ 0		
7	6000	Cambio de Gast Ballast	\$ 16,05	1	\$48,15	\$500,00	\$829,43
		Cambio de Aceite	\$11,72	8	\$281,28		

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

En total, la compañía ha invertido \$ 8641,83 en el mantenimiento de las 3 bombas de vacío, donde se puede ver que no ha sido del todo eficiente porque una la bomba 1, está dañada por las razones ya explicadas. En la sección de diagnóstico se puede observar las variables propuestas a medir, para evitar un exceso de mantenimiento en el cambio de los filtros.

3.10 Índices de mantenimiento

Se van a medir índices de mantenimiento con el fin de medir nivel del mantenimiento del área de facilidades, con el objetivo establecer mejoras o cambios en los planes de mantenimiento, además, es necesario medir los siguiente índices ya que con ellos se calcula probabilidades de falla de los equipos.

Los datos obtenidos corresponden desde el mes de marzo y abril del 2017:

Tabla 3.6 Valores del índice de mantenimiento de tiempo medio entre fallas acumulado para los equipos críticos de facilidades para los meses de marzo y abril del 2017

Área	Equipo	Codificación	Tiempo real de operación de las máquinas (horas)	Número de paros	TMEF
Cuarto Mecánico	Compresor de Tornillo 60 hp	CM-1-COM-1	1296	0	1296/0
	Secador de Aire 3 hp	CM-1-SDA-1	1296	0	1296/0
	Bomba de Vacío 10 hp (1)	CM-1-BDV-1	1296	0	1296/0
	Bomba de Vacío 10 hp (2)	CM-1-BDV-2	1296	0	1296/0
	Bomba de Vacío 10 hp (3)	CM-1-BDV-3	0	1	0

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Se puede observar que en los meses de marzo y abril en la mayoría de equipos no existieron paros, por lo tanto, en término matemáticos el tiempo medio entre fallas es infinito, ya que el límite de cualquier número real dividido entre cero es infinito.

Tabla 3.7 Valores del índice de mantenimiento tiempo medio entre reparación para los equipos críticos de Facilidades para los meses de marzo y abril del 2017

Área	Equipo	Codificación	Tiempo de paros (horas)	Número de Paros	TMER
Cuarto Mecánico	Compresor de Tornillo 60 hp	CM-1-COM-1	0	0	-
	Secador de Aire 3 hp	CM-1-SDA-1	0	0	-
	Bomba de Vacío 10 hp (1)	CM-1-BDV-1	0	0	-
	Bomba de Vacío 10 hp (2)	CM-1-BDV-2	0	0	-
	Bomba de Vacío 10 hp (3)	CM-1-BDV-3	1296	1	1296

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

En la Tabla 3.7 se puede observar en la columna del índice que al no haber paros no existe tiempo de paro del equipo, por lo tanto, el tiempo medio entre reparación es cero, ya que en el mes nunca ha ocurrido un fallo.

Tabla 3.8 Datos obtenidos del índice de mantenimiento de disponibilidad para los equipos críticos de Facilidades

Área	Equipo	Codificación	TMEF	TMER	Disponibilidad
Cuarto Mecánico	Compresor de Tornillo 60 hp	CM-1-COM-1	1296/0	-	100%
	Secador de Aire 3 hp	CM-1-SDA-1	1296/0	-	100%
	Bomba de Vacío 10 hp (1)	CM-1-BDV-1	1296/0	-	100%
	Bomba de Vacío 10 hp (2)	CM-1-BDV-2	1296/0	-	100%
	Bomba de Vacío 10 hp (3)	CM-1-BDV-3	0	1296	0%

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Se puede observar que según fórmula se posee infinito sobre infinito, lo que matemáticamente se entiende como si el resultado es 1, por lo tanto, la disponibilidad de la mayoría de equipos es de 100%. Y en el caso de la bomba de vacío al no repararse el equipo en el mes de marzo ni abril, la disponibilidad de la máquina es cero.

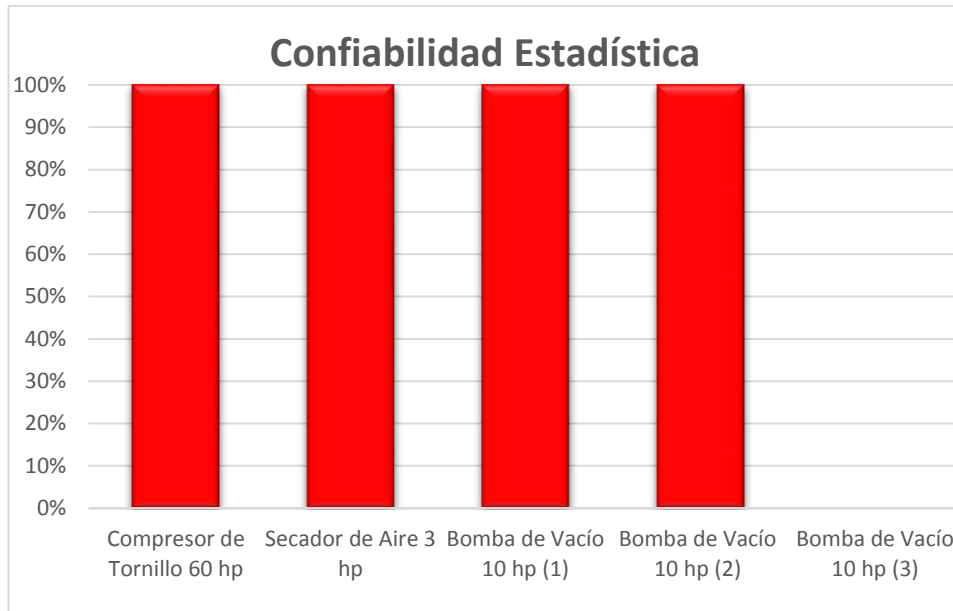
Tabla 3.9 Datos del índice de mantenimiento de confiabilidad estadística para los meses de marzo y abril del 2017

Área	Equipo	Codificación	TMEF	Hora	Confiabilidad Estadística
Cuarto Mecánico	Compresor de Tornillo 60 hp	CM-1-COM-1	1296/0	24	100%
	Secador de Aire 3 hp	CM-1-SDA-1	1296/0	24	100%
	Bomba de Vacío 10 hp (1)	CM-1-BDV-1	1296/0	24	100%
	Bomba de Vacío 10 hp (2)	CM-1-BDV-2	1296/0	24	100%
	Bomba de Vacío 10 hp (3)	CM-1-BDV-3	0	24	0%

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

En la Tabla 3.9 se puede observar los datos medidos de confiabilidad estadística donde la columna de hora se refiere al tiempo en el cual se mide la confiabilidad del equipo, se decidió realizar cada 24 horas ya que la jornada de los equipos es de 24 horas seis días a la semana.

Como se observa en la Gráfica 3.6 la mayoría de los equipos que la confiabilidad del funcionamiento es de 100%, ya que en el mes de marzo ni abril no se ha tenido ningún fallo.



Gráfica 3.6 Datos de confiabilidad estadística de los equipos críticos de Facilidades para los meses de marzo y abril

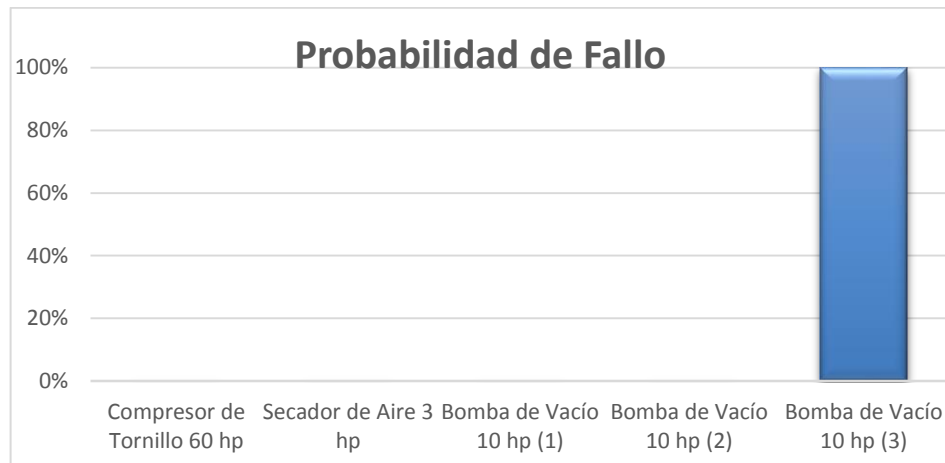
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Tabla 3.10 Datos del índice de mantenimiento probabilidad de fallos

Área	Equipo	Codificación	Confiabilidad Estadística	Probabilidad de fallo
Cuarto Mecánico	Compresor de Tornillo 60 hp	CM-1-COM-1	100%	0%
	Secador de Aire 3 hp	CM-1-SDA-1	100%	0%
	Bomba de Vacío 10 hp (1)	CM-1-BDV-1	100%	0%
	Bomba de Vacío 10 hp (2)	CM-1-BDV-2	100%	0%
	Bomba de Vacío 10 hp (3)	CM-1-BDV-3	0%	100%

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

En la Tabla 3.10 se puede observar que la probabilidad de fallo de la mayoría de equipos es cero, como se ha mencionado anteriormente, no se han reportado fallos en el mes de marzo, por lo tanto, la probabilidad de fallo es cero. Es importante entender que este indicador es útil cuando se tienen datos de índices acumulados de varios meses o años, pero como nunca se ha medido estos en la empresa no se pueden tener mejores resultados.



Gráfica 3.7 Datos de tasa de probabilidad de fallo de los equipos críticos de Facilidades

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Del análisis de indicadores se puede entender que la inversión de mantenimiento preventivo está dando resultados, ya que la disponibilidad y confiabilidad de los equipo es muy alta, la idea es comenzar a reducir costos de mantenimiento preventivo siempre buscando obtener los mismo resultados, ya que si se ahorra en mantenimiento pero la máquina no se encuentre disponible quiere decir que algo no se realizó correctamente, por eso es importante poseer información que respalde las rutinas realizadas.

4 Propuesta del modelo PHM en los equipos críticos de facilidades

A continuación se muestra el modelo de PHM propuesto para la empresa Zollner Electronics Costa Rica.

En la

Figura 4.1 se puede observar el desarrollo del Modelo de PHM en un diagrama, donde se ven las entradas y salidas del sistema, y con qué metodología se desarrollan.

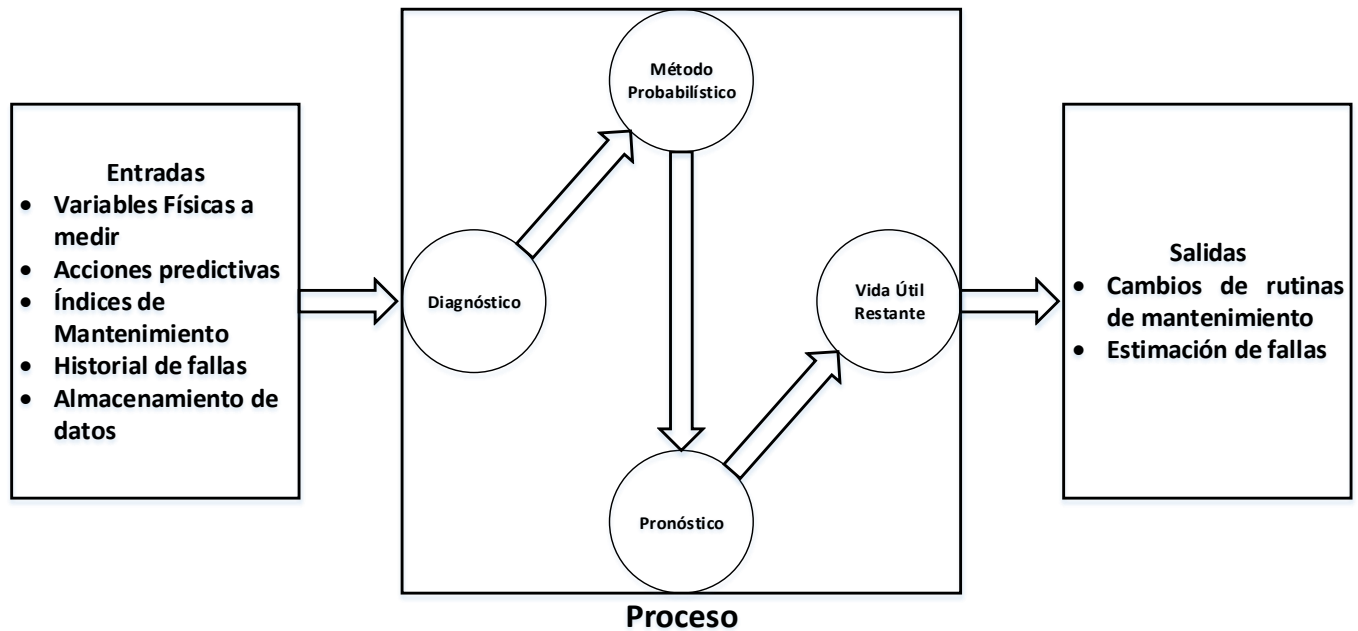


Figura 4.1 Modelo de PHM

Fuente: Elaboración Propia (Visio 2013)

Es importante mencionar que para desarrollar este modelo se toma como referencia la Figura 2.4, donde se indican los pasos para desarrollar el modelo según Vogl, Weiss, & Helu. (2016)

4.1 Propuesta de Diagnóstico

A continuación se muestra los aspectos que se consideran necesarios para iniciar las bases del diagnóstico del modelo de PHM.

4.1.1 Propuesta de plan de mantenimiento predictivo

La idea del método de PHM es el monitoreo constante del equipo, poseer datos confiables para la correcta aplicación de métodos probabilísticos que ayuden a generar correctas rutinas de mantenimiento, y no depender tanto de lo indicado por los fabricantes o proveedores de la maquinaria. Esto se logra mediante la recolección de datos con la correcta medición de variables físicas con técnicas de mantenimiento predictivo.

Como la empresa no posee un plan de mantenimiento predictivo definido y además no posee el equipo necesario, se va a generar una propuesta del mismo, ya que este tipo de mantenimiento es la base para aplicar el método de PHM (Pronóstico y gestión de la salud), además, la idea es generar la necesidad de poseer el equipo, siempre buscando no generar gastos innecesarios, y respaldos con un correcto análisis económico.

Se comenzará generando un flujo-grama con los pasos necesarios para realizar el correcto mantenimiento, luego se buscará la cotización de aplicar mantenimiento predictivo a los equipos de la empresa. Es necesario indicar que sólo se va a realizar para algunos equipos críticos de la compañía.

4.1.2 Diagrama de flujo para acciones predictivas

A continuación se muestra el flujo de trabajo para poder realizar las actividades de mantenimiento predictivo.

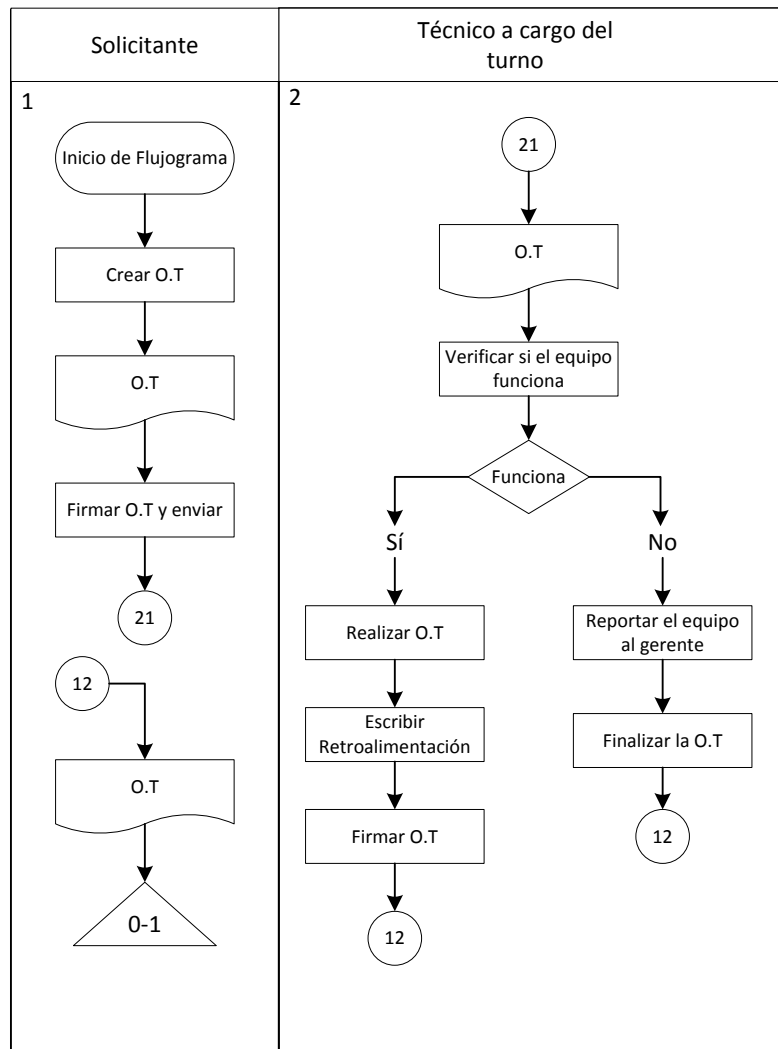


Figura 4.2 Diagrama de flujo para las actividades de mantenimiento predictivo
Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Visio 2013)

En la Figura 4.2 se relaciona al mantenimiento predictivo cuando se posee el equipo, es decir, que está a disposición de la compañía, y no es necesario subcontractarlo, por eso motivo sólo participan dos miembros, el encargado de realizar la orden de trabajo, y el técnico que la ejecuta.

A continuación, se muestra la orden de trabajo cuando se deba de subcontractar el mantenimiento predictivo, como en el caso de analizador de vibraciones, donde es muy costoso para comprarlo, y también análisis de aceite, y además son las únicas actividades predictivas que se realizan actualmente en la empresa.

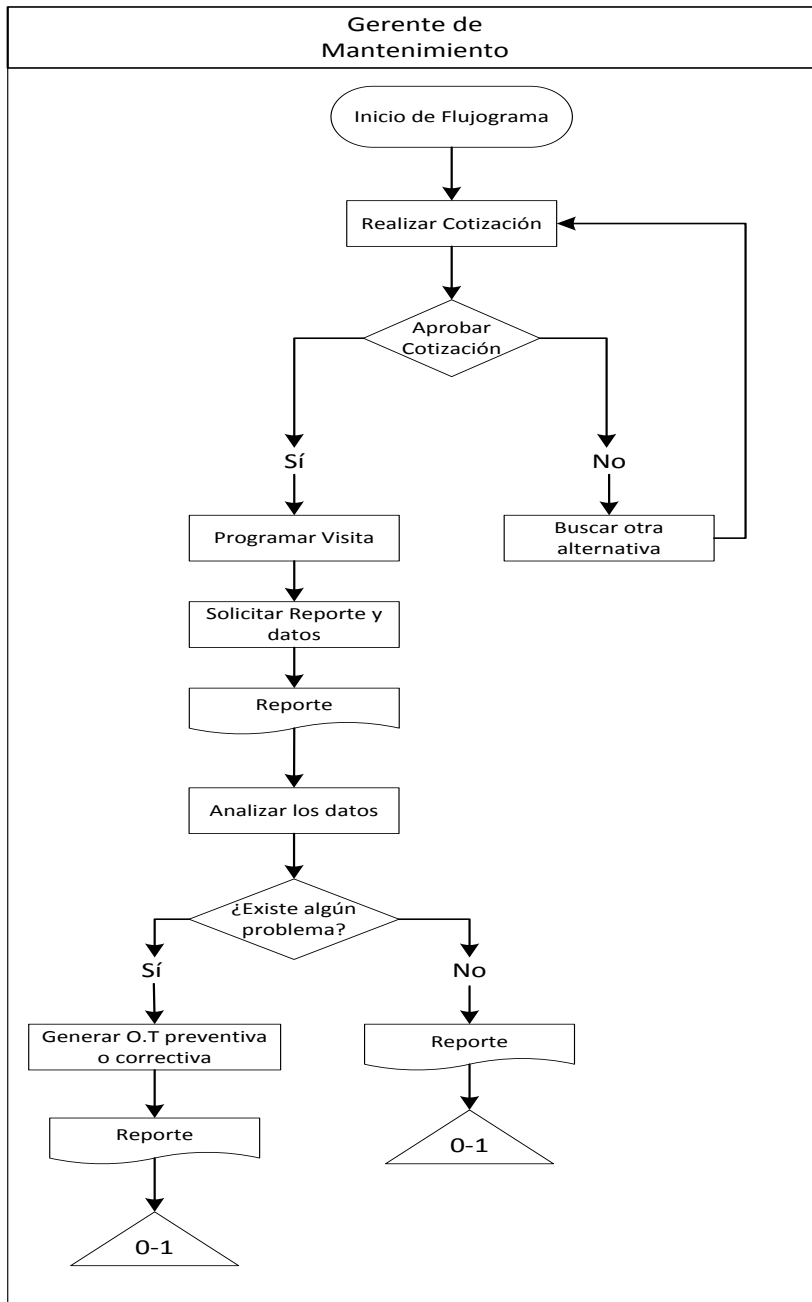


Figura 4.3 Flujo-grama de trabajo predictivo cuando tercerizado

Fuente: Elaboración Propia (Visio 2013)

4.1.3 Fichas técnicas de los equipos críticos

A continuación, se muestran fichas técnicas de los equipos críticos de Facilidades, el fin de realizarlas es poseer valores de referencia sobre variables físicas que se van a medir cuando se realice el mantenimiento predictivo o bien cuando se analicen los datos entregados por los sensores. Además en muchas ocasiones se pierden los datos de placa de los equipos, por lo tanto, es mejor poseer un registro digital de las máquinas, para evitar ese problema. En esta sección se va a colocar una de las fichas técnicas



Ficha técnica de maquinaria

Máquina:	Compresor	Ubicación: Cuarto Mecánico
Fabricante:	Ingersoll Rand	Sección: Facilidades
Modelo:	INR60H-OF	N° Serie: TA000540U14236
Marca:	Nirvana	

Características técnicas:

- Fuente de alimentación:
230/460 V, 60 Hz, 3 fases
- Potencia 60 hp
- Presión Máxima 125 psi
- Revoluciones del motor 3570 rpm
- Corriente máxima 90 A

Funciones:

- Generar aire comprimido con la presión necesaria para poder correr producto en las máquinas de producción



Elaborado por: J.González 2017

**Figura 4.4 Ficha técnica del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)**

En la Figura 4.4 se observa la ficha técnica del compresor de tornillo, en la cual se puede observar que la ficha tiene características técnicas del compresor, posee las funciones del equipo, además de una fotografía, y también del número de serie para poseer un control si se poseen varios equipo parecidos, y el modelo por si alguna vez se daña el equipo y quiere comprar el mismo modelo.

4.1.4 Variables a monitorear en equipo crítico

A continuación se muestran las variables físicas que se deben monitorear para poder obtener un estado real de la máquina, y con ello poder predecir posibles fallas. Además, para poder aplicar el modelo de PHM es necesario tener datos con el fin de aplicar los elementos del método que son diagnosticar y pronosticar.

4.1.4.1 Monitoreo de vibraciones mediante analizador de vibraciones

Con el monitoreo en línea de vibraciones se pueden determinar aspectos como desgaste prematuro de los rodamientos del motor, des-alineamiento del eje, desbalance, mal acople, bases flojas y problemas eléctricos. Obteniendo esta información se pueden proyectar rutinas de mantenimiento preventivo con base ingenieril y no sólo lo que los fabricantes recomiendan.

4.1.4.2 Flujo de consumo de aire comprimido

Mediante la medición del flujo de aire se pueden determinar valores de consumo para estimar el costo económico de producirlo, y así poder realizar planes de ahorro energético. Además, mediante un monitoreo constante del mismo se puede detectar posibles pérdidas de aire comprimido producido por fugas en las red de distribución, esto se lograría observando-si-existe-mayor-consumo-a-partir-de-un-tiempo-determinado.

4.1.4.3 Flujo de consumo de vacío

La idea de medir el flujo de vacío sirve para medir la cantidad utilizada en la empresa, con el fin de proyectar utilización de las tres bombas de vacío que existen, es decir, generalmente la empresa se abastece con sólo dos de las tres bombas, una de ellas se encuentra como de respaldo, entonces si se logra medir el flujo se puede comprobar que cuando se rotan las bombas si se suministre la carga necesaria, y si no se logra es porque existen un problema en algunas de las bombas. Además medir el flujo sirve para proyectar planes de ahorro energético.

También sirve para determinar posibles fugas en la red de vacío de la misma forma que se realiza al medir el flujo de aire comprimido.

4.1.4.4 Presión

Con la ayuda de esta variable se puede determinar al igual que con el consumo, pérdidas de presión por factores de fugas en la red de tuberías. Además, es necesario conocer la presión para verificar que el aire llegue a cada una de las máquinas de manera correcta con los parámetros de presión necesario para su correcto funcionamiento, con ellos se evitarían posibles problemas en las máquinas de producción.

Además, se podrían colocar sensores de presión en la salida y entrada de los filtros de aire, con esto se podría monitorear el desgaste de los ellos, donde sí se observa una pérdida considerable de presión será por motivo de un filtro sucio o dañado.

4.1.4.5 Voltaje, corriente, y potencias

El monitoreo constante de estas variables funcionan para poder determinar la condición del equipo, y conocer el comportamiento a través del tiempo. Un cambio en el voltaje o corriente puede dar indicios de posibles desbalances en las líneas de alimentación, problemas en pérdidas de fases en el estator, constantes disparos de las protecciones, pérdidas de energía por exceso de calor, calentamiento del motor, desgaste del aislamiento y daños en el motor. Además, al medir la potencia se puede determinar el consumo del equipo, para ayudar a generar ahorros energéticos.

Al medir el voltaje y corrientes se puede determinar posibles picos de corrientes, que en muchos casos son los causantes de daños en lo equipos.

4.1.4.6 Caída de presión en el filtro de aceite del compresor

Esta variable ya se está midiendo pero de manera manual, es decir, el técnico al hacer la rutina diaria revisa la caída de presión y la anota, pero la idea es almacenar de manera remota los datos medidos usando el datalogger que posee la empresa.

4.1.4.7 Caída de presión en el filtro de aire del compresor y de las bombas de vacío.

Al igual que en el anterior también se están midiendo los datos, pero no almacenando, igual que en el anterior la idea es guardar los datos en un datalogger (registrador de datos) con el fin de poseer datos y así predecir fallas.

4.1.5 Costo de mantenimiento predictivo contratado

Se solicitó información sobre costo económico de actividades predictivas como análisis de vibraciones en el compresor, y termo-grafía en el compresor, bombas de vacío. Donde el costo total de la cotización es de \$ 450 como se puede observar en la Figura 9.4 sección de anexos.

4.1.6 Costo de mantenimiento predictivo usando sensores y monitoreo en línea

Se cotiza un sistema de monitoreo en línea para análisis de vibraciones con un costo de \$ 7494 solo el datalogger y no los sensores. Lo cual se considera un sistema costoso, y además los equipos que se poseen no son tan robustos para analizarlos constantemente, y hacer una inversión tan grande. Por lo tanto, si se quiere analizar vibraciones se recomienda mejor contratar el servicio.

Actualmente la compañía posee un datalogger que fue instalado cuando se construyó la empresa, por lo tanto, se recomienda darle más uso a este equipo, ya que en un sistema en monitoreo en línea siempre es el equipo más costoso. A este equipo se le pueden conectar más sensores que midan temperatura, flujo, presión.

4.1.7 Propuesta de Self-Maintenance (mantenimiento propio)

La idea del mantenimiento propio (self-maintenance) se va a realizar mediante la colocación de datos de sensores de medición de corrientes y de temperatura mediante el uso del dispositivo Arduino, sólo se va a limitar al compresor, ya que es el equipo más crítico, además el fin es iniciar de manera escalonada el monitoreo en los equipos de facilidades, para que el cambio no sea tan repentino, y además que la inversión inicial no sea muy costosa.

El objetivo es colocar un sistema cómodo económicamente y fácil de utilizar para comenzar a establecer las bases para el desarrollo del modelo de PHM. Posterior se va a recomendar colocar sensores de mayor precisión y calidad, para ir mejorando la confiabilidad de los datos y por lo tanto de las rutinas de mantenimiento relacionados al estado del equipo.

La idea de medir corriente se basa en primero tener conocimiento si existe un desbalance de corriente en las líneas del compresor, luego observar el comportamiento del compresor cuando se solicita mayor cantidad de flujo y presión, ya que este equipo no funciona como un compresor normal que llega a un presión seteada y luego se apaga, sino que se modula según la demanda solicitada por los equipos en producción, por lo tanto, mayor trabajo del motor se necesita suministrar más corriente.

Además, la idea de medir corrientes también sirve para verificar en que momentos se genera mayor consumo en el compresor, ya que la idea es no trabajar el compresor a mayor carga cuando se encuentre en el rango de pico en la tarifa de media tensión. Entonces con el conocimiento de los mayores picos de corrientes se puede conocer cuando se está solicitando mayor trabajo a la máquina.

4.1.7.1 Sensor medición de Corriente no invasivo

Mediante este sensor se pueden medir corrientes de hasta 100 A, y cable que se puede colocar es aproximadamente no mayor a 13 mm. Este dispositivo no es costoso, y fácil de conseguir si por alguna razón llegara a fallar. El mantenimiento del mismo es nulo, ya que sería más costoso su reparación que comprarlo nuevo.

La idea es colocarlo en una de las líneas, ya que el compresor es trifásico, y mediante un amperímetro de gancho verificar si existe desbalance en el voltaje, si no es así, comenzar a medir la corriente, y entonces se supone que por teoría la corriente en las 3 líneas es igual, cuando no existe desbalance, eso es lo que se quiere verificar, por el momento colocar uno para ver cómo se comporta el sensor cuando la red es trifásica.



Figura 4.5 Sensor de Corriente no invasivo

Fuente: CrCibernetica.com

4.1.7.2 Sensores propios del Compresor Ingersoll Rand 60 hp

Además, para iniciar el mantenimiento propio se va a utilizar los datos de las alertas que el mismo equipo produce cuando existe algún fallo. El compresor de tornillo marca Ingersoll Rand de 60 hp, posee un sistema de monitoreo propia del cual se puede obtener datos importantes como temperatura de los rodamientos, velocidad de motor, presión del aceite de los rodamientos, temperaturas de entrada del aire, caída de presión en el filtro de aceite, estado del filtro de entrada del aire. La idea de PHM es buscar que mediante diferentes variables verificar el estado del equipo, y así establecer poder diagnosticar y pronosticar una falla. Además cuando existen algún cambio y que se encuentre fuera de los parámetros normales de trabajo el sistema genera una alerta y si el daño es muy grave el equipo se detiene por protección.

A continuación se muestran fotografías sobre algunas de las variables que se pueden medir directamente del compresor.

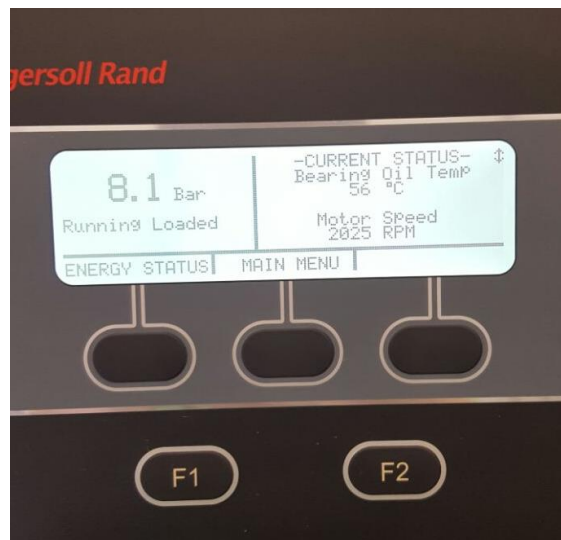


Figura 4.6 Estado de la temperatura del rodamiento

Fuente: J. González (2017)



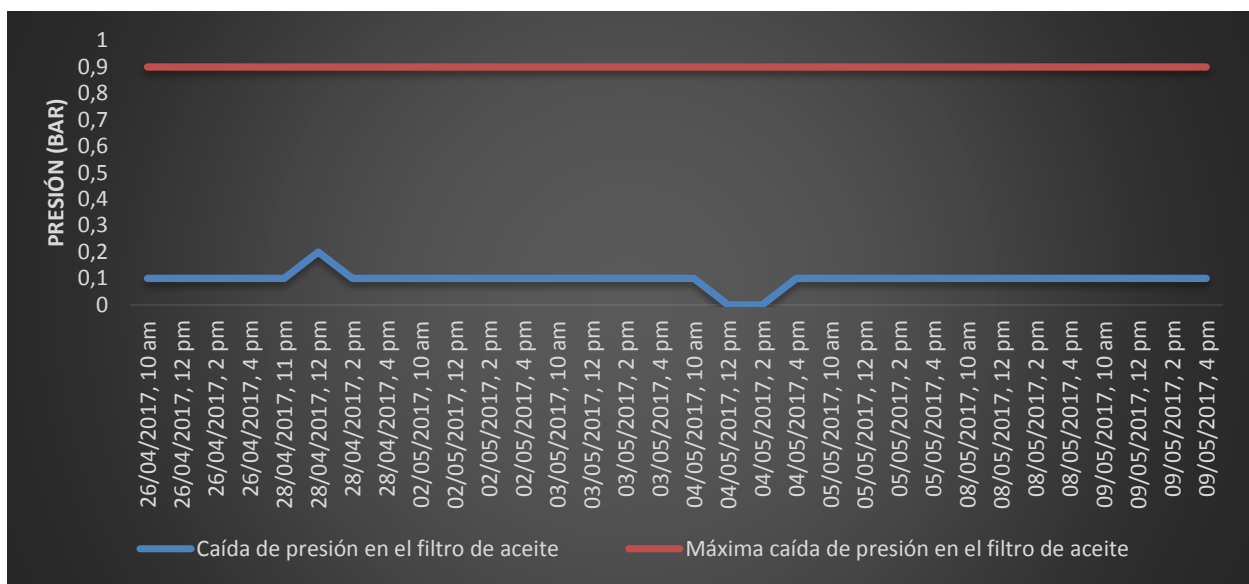
Figura 4.7 Estado del filtro de aceite y temperatura de entrada del compresor
Fuente: J. González (2017)



Figura 4.8 Estado del filtro de succión
Fuente: J. González (2017)

A continuación, se muestra datos del comportamiento de la temperatura de los rodamientos, caída de presión en el filtro de aceite y del aire, con el fin de determinar rutinas de mantenimiento basado en lo indicado en el manual de usuario, para luego analizarlos, y obtener datos para poder estimar mediante métodos probabilísticos los tiempos de las rutinas de mantenimiento de una forma fundamentada y no solo siguiendo lo indicado por el proveedor. Es importante mencionar que el límite de las mediciones fue cuando el compresor llegó a las 14.000 horas de funcionamiento, ya que según el proveedor es cuando se deben de realizar los cambios de los filtros, cada 2000 horas, el pasado mantenimiento fue a las 12000 horas.

4.1.7.2.1 Caída de presión en el filtro de aceite



Gráfica 4.1 Caída de presión en el filtro de aceite

Fuente: Elaboración propia (Excel 2013)

Según el manual de usuario del fabricante del compresor Ingersoll Rand Nirvana 60 hp, el filtro de aceite se debe de cambiar cuando la caída de presión medida sea mayor a 0,9 bar, lo que quiere decir como se observa en la Gráfica 4.1 que existe un sobre mantenimiento de 5 veces al año en el filtro de aceite, es decir, se está cambiando el filtro más 5 veces cuando en realidad se debería de cambiar cada 8000 horas o cuando llegue a la caída de 0,9 bar esto según el fabricante, este tiempo se podría extender dependiendo de cómo se comporte en compresor cuando se le extiende un poco más el uso del filtro.

4.1.7.2.2 Caída de presión en el filtro del aire



Gráfica 4.2 Caída de presión en el filtro de aire

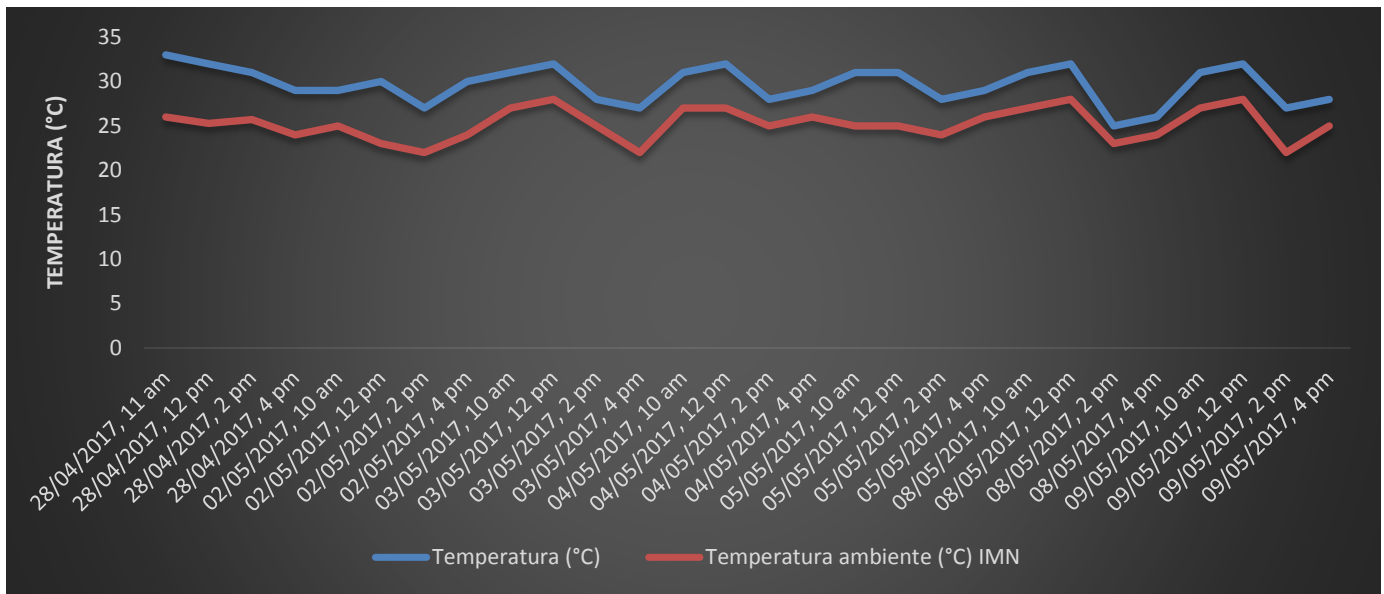
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2015)

Y en el caso del filtro del aire el manual de usuario indica que se debe de realizar el cambio del filtro cuando la caída de presión sea mayor a 0,07 bar, y en este caso el sensor de presión siempre indicó que la caída fue 0 bar, por lo tanto, hay un exceso de mantenimiento, el cual es de 5 cambios al año, cuando en realidad según el fabricante solo se necesitan realizar cuando alcancé las 4000 horas por lo tanto serían 2 cambios de filtros de aire al año.

4.1.7.2.3 Sensor de temperatura de entrada del aire al compresor

También los sensores funcionan para conocer la condición de entrada de aire al compresor, el sensor que se encuentra mide la temperatura de entrada del aire al equipo, esto sirve para observar como entra aire al compresor, ya que entre mayor sea la temperatura del aire de entrada al compresor con relación a la temperatura ambiente la eficiencia del compresor es la que se afecta.

No existe exactamente un teorema exacto de cuánto exactamente se pierde en la eficiencia del compresor, pero algunos proveedores como Kaeser indican que aproximadamente se puede decir, que por cada 2 grados Celsius de aumento de temperatura de entrada de aire respecto a temperatura ambiente se afecta 1% la eficiencia del compresor.



Gráfica 4.3 Temperatura de entrada del aire al compresor

Fuente: Elaboración propia (Excel 2013)

4.1.8 Conexión al Datalogger Delphin.

Para poder almacenar los datos del compresor se va a conectar la salida de los sensores al datalogger que se encuentra en la empresa, por lo tanto a continuación se muestra los pasos necesarios para conectarlos.

4.1.8.1 Sensores que emiten señal de voltaje no mayor a 10 V

Measuring voltage at analogue input

Sensors with voltage signal can be directly connected.



The largest measurement range is $\pm 10\text{V}$ bipolar or 10 V unipolar.

The smallest range is $\pm 156\text{mV}$ bipolar and 156 mV unipolar.

Figura 4.9 Conexión de cualquier sensor que envíe voltaje y sea analógico

Fuente: Hardware Manual ProfiMessage-Installation and start up (2016)

En la Figura 4.9 se muestra la conexión que se debe de hacer cuando se posee un sensor que en su señal envíe un voltaje no mayor a 10 V.

4.1.8.2 Sensores de temperatura

Al ser termo-cuplas, el fabricante del datalogger indica que solo se deben de conectar en paralelo a la entrada de la señal analógica, como se muestra en la Figura 4.10

Thermocouples can be directly connected. Use the configuration dialogue to set the type (J, K, T, R, etc.).



Figura 4.10 Conexión de cualquier termococupla al datalogger
Fuente: Hardware Manual ProfiMessage-Installation and start up (2016)

4.1.8.3 Sensores que generan señales de corriente

A este tipo de sensores se le debe de conectar una resistencia de $500\ \Omega$ para que el equipo pueda medir la señal, ya que transforma la señal al voltaje que se pueda medir, generalmente este tipo de sensores generan corrientes de 20 mA.

Measuring 20 mA current at analogue input

For sensors with current signals you must connect what is known as a load resistor to the device input terminals. Suitable resistors are available as accessories.



Figura 4.11 Sensores que generan señales de corrientes

Fuente: Hardware Manual ProfiMessage-Installation and start up (2016)

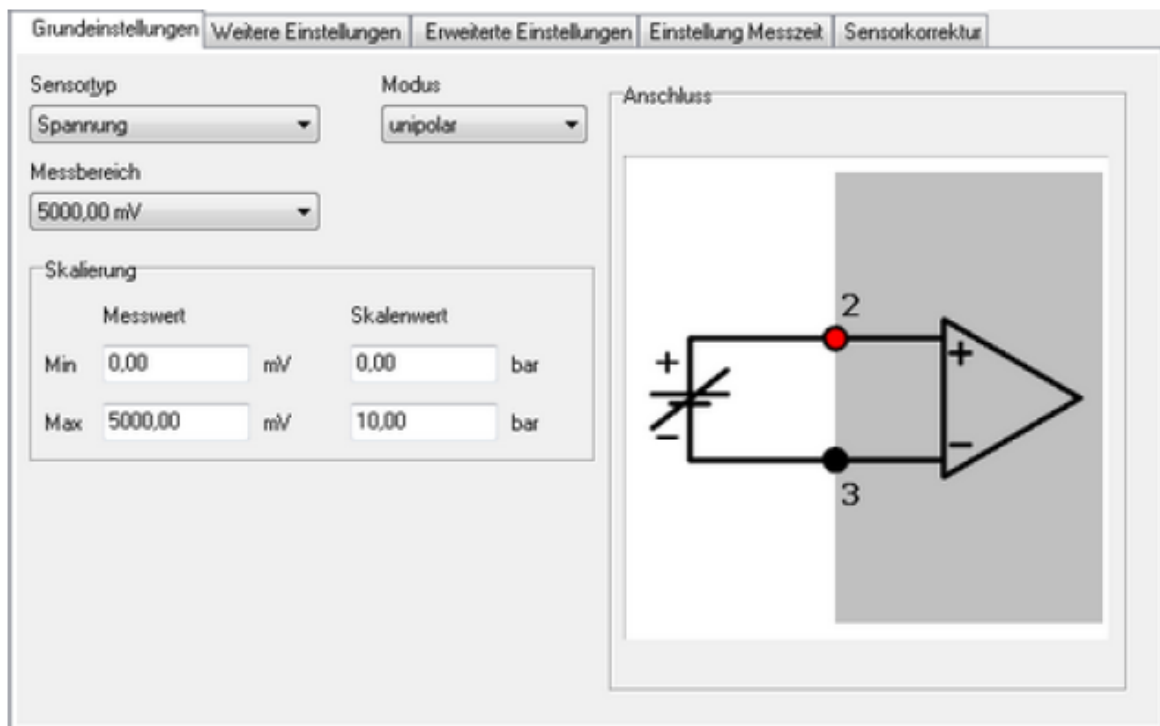
4.1.9 Programación de los sensores en el datalogger Delphin

Al ser un equipo con una interfaz sencilla solo se debe de colocar el tipo de sensor que se está usando, además de conocer las especificaciones técnicas de los rangos de voltaje respecto a la variable que se está midiendo, de la misma forma si fueran de corriente. Los datos se solicitaron al proveedor del compresor, Cummings, los cuales dijeron que sí podían entregar la información, pero el encargado del sistema de control se encontraba incapacitado y no tiene acceso remoto a la información. En la sección de anexos en la Figura 9.9 se puede observar el correo relacionado al tema.

4.1.9.1 Sensores de presión

En la Figura 4.12 se muestra como se programa el sensor de voltaje, el ejemplo se refiere a un sensor de presión donde se solicita los rangos de voltaje respecto a la presión, con el fin de establecer los límites y presión y además de conocer el comportamiento del mismo.

Voltage sensor type



The example means: 0 mV corresponds to 0 bar, 5 V corresponds to 10 bar.

Figura 4.12 Programación del sensor de voltaje en el datalogger Delphin

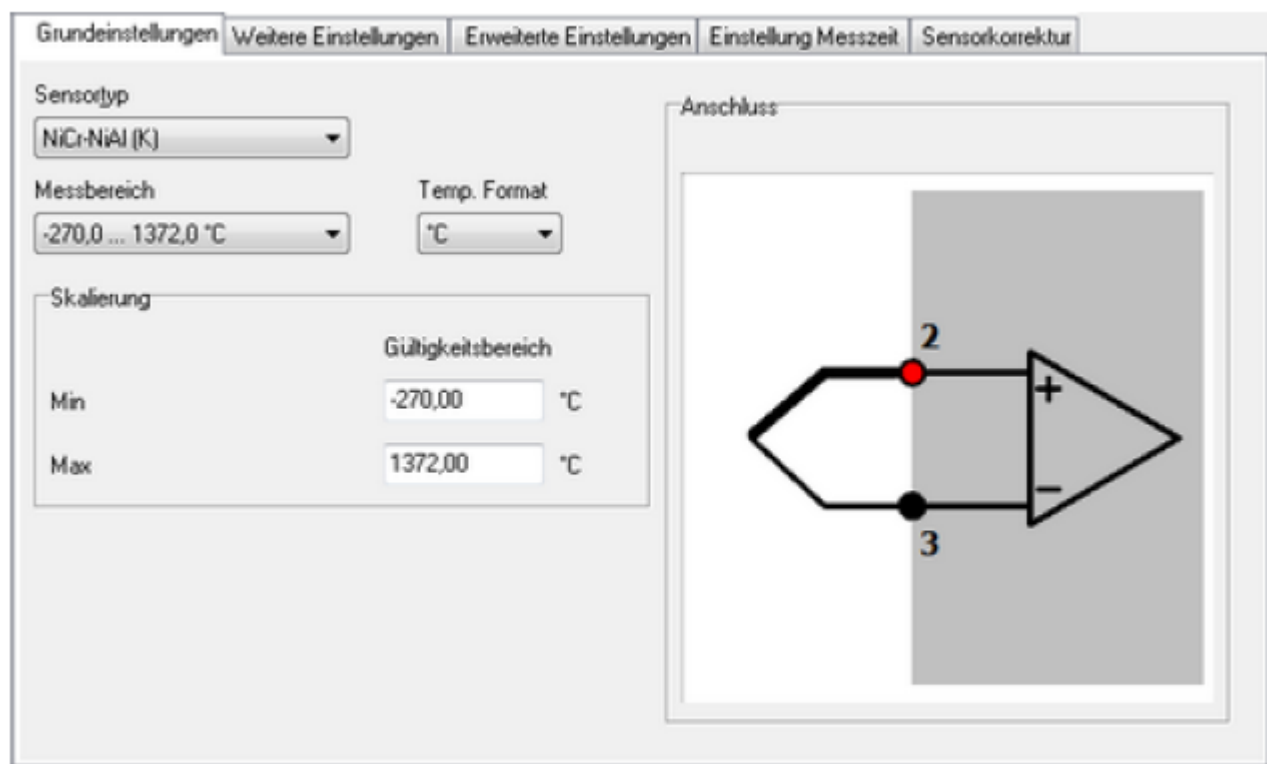
Fuente: Hardware Manual ProfiMessage-Installation and start up (2016)

Lo único que se necesita es conocer las características técnicas de los sensores.

4.1.9.2 Sensores de temperatura

Se debe de conectar el sensor de temperatura de la siguiente forma, lo único que se necesita saber las temperatura mínimas y máximas del sensor, en el ejemplo se muestra que es un sensor tipo K, además, de colocar la unidad de medición a la cual se quiere ver los datos.

Thermocouple sensor type



The example shows the settings for a type K thermocouple (NiCr-NiAl, nickel-chrome and nickel-aluminium alloy).

Figura 4.13 Programación del sensor de temperatura

Fuente: Hardware Manual ProfiMessage-Installation and start up (2016)

4.1.10 Recolección y análisis de datos

En la compañía ya se posee un sistema para la recolección de datos, este sería mediante un dispositivo llamado Delphin, que es un tipo de sistema de monitoreo en línea que tiene conectados los siguientes sensores:

Tabla 4.1 Monitoreo de equipo mediante sensores

Equipo monitoreado	Sensores
Compresor	Presión y Caudal
Bombas de Vacío	Presión y Caudal
Tableros eléctricos principales	Corrientes, voltaje, factor de potencia y potencia real

Fuente: Elaboración Propia (Microsoft Word 2013)

El uso que se les da a estos sensores no es tan constante, es decir, no se monitorean lo suficiente como se debería, esto por muchos factores, como la falta de tiempo del encargado del área, la falta de conocimiento del sistema en algunas funciones.

Es importante mencionar que estos datos se han usado más para planes de ahorro energético que directamente en mantenimiento de los equipos, ya que no se ha podido ligar los datos obtenidos con mejoras en los planes de mantenimiento preventivo, esto se puede explicar con que no son variables tan directas a la medición del equipo, sino más al monitoreo del sistema de distribución.

Para el desarrollo del proyecto se propone utilizar el Delphin como sistema de recolección de datos, hacer uso de los sensores actuales, y poco a poco comenzar a colocar nuevos, buscando conocer mejor los equipos.

La empresa posee un sistema de recolección de datos para los sensores que se utilizan para medir caudal, presión del compresor y bombas de vacío. Donde se utiliza un dispositivo de recolectar de datos marca Delphin, donde el cual es un datalogger que almacena la información y se transmite al servidor principal de la compañía. Antes del proyecto no se estaba almacenando información importante como las presiones y flujos de aire y vacío, solamente se guardaba datos de consumo total de aire comprimido, vacío, nitrógeno y agua, esto se realizaba solamente para proyectar gastos anuales, observar picos de consumo para posibles proyectos de ahorro energético.



Figura 4.14 Adquisidor de datos marca Delphin Profi Message
Fuente: (González, 2017)

Al dispositivo de la izquierda en la Figura 4.14 se le puede colocar 7 entradas digitales donde sólo se han usado 3 de ellas, por lo tanto, aún queda espacios disponibles para poder medir variables como temperatura, se puede colocar sensores de presión en la salida y entrada de los filtros, medir humedad en el ambiente de producción el cual debe de ser un sector controlado.

En el esclavo (dispositivo que se encuentra en la derecha de la Figura 4.14 posee dos tarjetas que se le pueden conectar señales digitales como analógicas, donde la tarjeta de arriba posee 7 espacio disponibles para conectarle entradas digitales, mientras que la de abajo tiene 16 espacios para entradas analógicas de las cuales sólo se están usando 5, por lo tanto se posee 11 espacios disponibles para conectar sensores analógicos

Esto es beneficioso sí se quiere monitorear más equipos, ya que, se posee el equipo más costoso cuando se quiere desarrollar un monitoreo en línea, que es el dispositivo adquirente de datos, ya que generalmente los sensores son más cómodo económicamente que el datalogger

Además, este dispositivo también permite medir vibraciones pero necesita de un módulo que es costoso, y que no es tan versátil como un medidor de vibraciones, las diferencias es que el módulo del Delphin no permite observar directamente la forma de onda de las vibraciones, sino que solo se puede leer picos, y además no posee un software que permita un análisis correcto de los resultados. En la sección de anexos se muestra la cotización del módulo y también del dispositivo marca Delphin llamado Expert Vibro, el cual es un medidor de vibraciones estacionario.

Tabla 4.2 Costo de Análisis de Vibraciones

Dispositivo	Costo	Costo (Colones)
ProfiMessage (Slave)	\$ 4 930	₡ 2 274 372
Expert Vibro	\$ 7 494	₡ 4 168 944

Fuente: Elaboración Propia (Word 2013),

Nota: Precio del dólar es de ₡ 569 en mayo 2017

En ambos casos no se recomiendan para el proyecto, por el alto costo de ambos, y los equipos que se poseen en facilidades son costosos pero no para estarlos monitoreando constantemente. Además, a ese costo se tiene que sumar a una capacitación del personal para que sea correcto el análisis de vibraciones y aprovechar por completo el dispositivo, y también el servicio de instalación, además se debe de agregarse sensores de vibraciones lo cual aumentaría mucho más la propuesta. Es recomendable subcontratar el servicio cada año, para ver cómo se comportan los equipos respecto al desgaste, y así comenzar a determinar las rutinas necesarias para evitar detener el equipo.

4.1.10.1 Historial de sensores de la empresa

A continuación se muestra lectura de los sensores que posee la empresa (se mide desde el 14 de marzo del 2017), el datalogger (registrador de datos) FLUKE conectado a las tres líneas de compresor, y sensor de corriente del Arduino. En esta sección se van a mostrar y a la vez analizar los datos, con el fin de pronosticar el comportamiento o fallas del equipo, como por ejemplo: verificar puntos altos o bajos en los sensores, posibles picos de corrientes, cambios en el consumo de aire comprimido o vacío.

Referente a los sensores de la empresa (presión, consumo), se registra medición desde el día mencionado ya que anteriormente, no se guardaba la información.

4.1.10.1.1 Medición de datalogger marca Fluke

Con el fin de comprobar los datos medidos por el sensor de corriente con arduino se conectó un datalogger marca Fluke modelo 1730, se colocaron donas especiales de medición en las tres líneas de alimentación del compresor con el objetivo de determinar posibles desbalances de corriente del equipo, y evitar problemas como se mencionaron en la sección de variables a monitorear en equipo crítico. A continuación se muestra los datos obtenidos por el equipo de medición y también la conexión del equipo en el panel eléctrico del compresor:

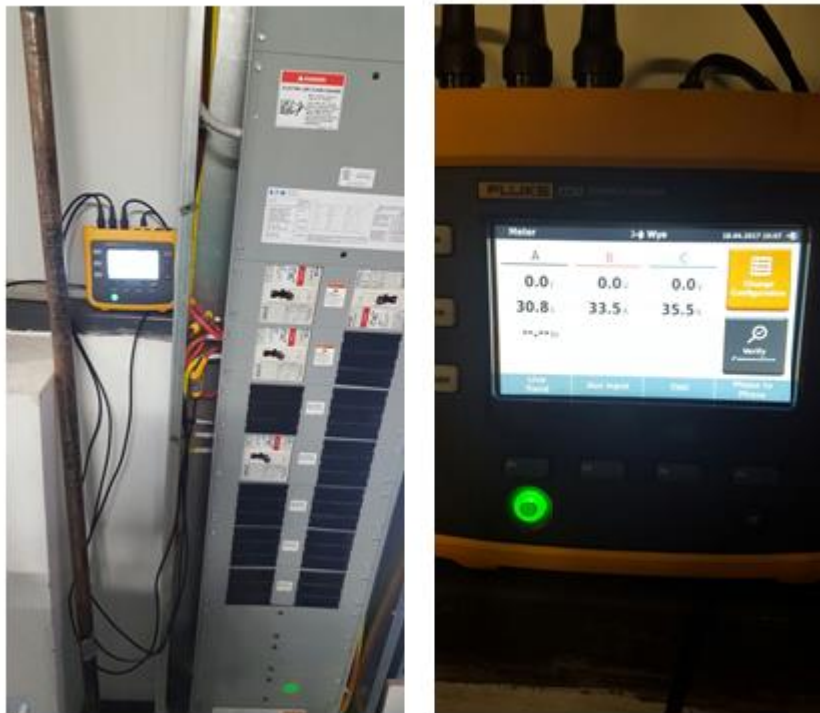


Figura 4.15 Instalación del equipo de medición Fluke 1730 en el panel del compresor Ingersoll Rand

La prueba de medición se inició el 14 de marzo del 2017 a las 11:43 am, y se terminó el 10 de abril del 2017 a las 8 am, la idea era tomar datos un mes completo pero el dispositivo se quedó sin memoria, pero igual la información tomada es útil.

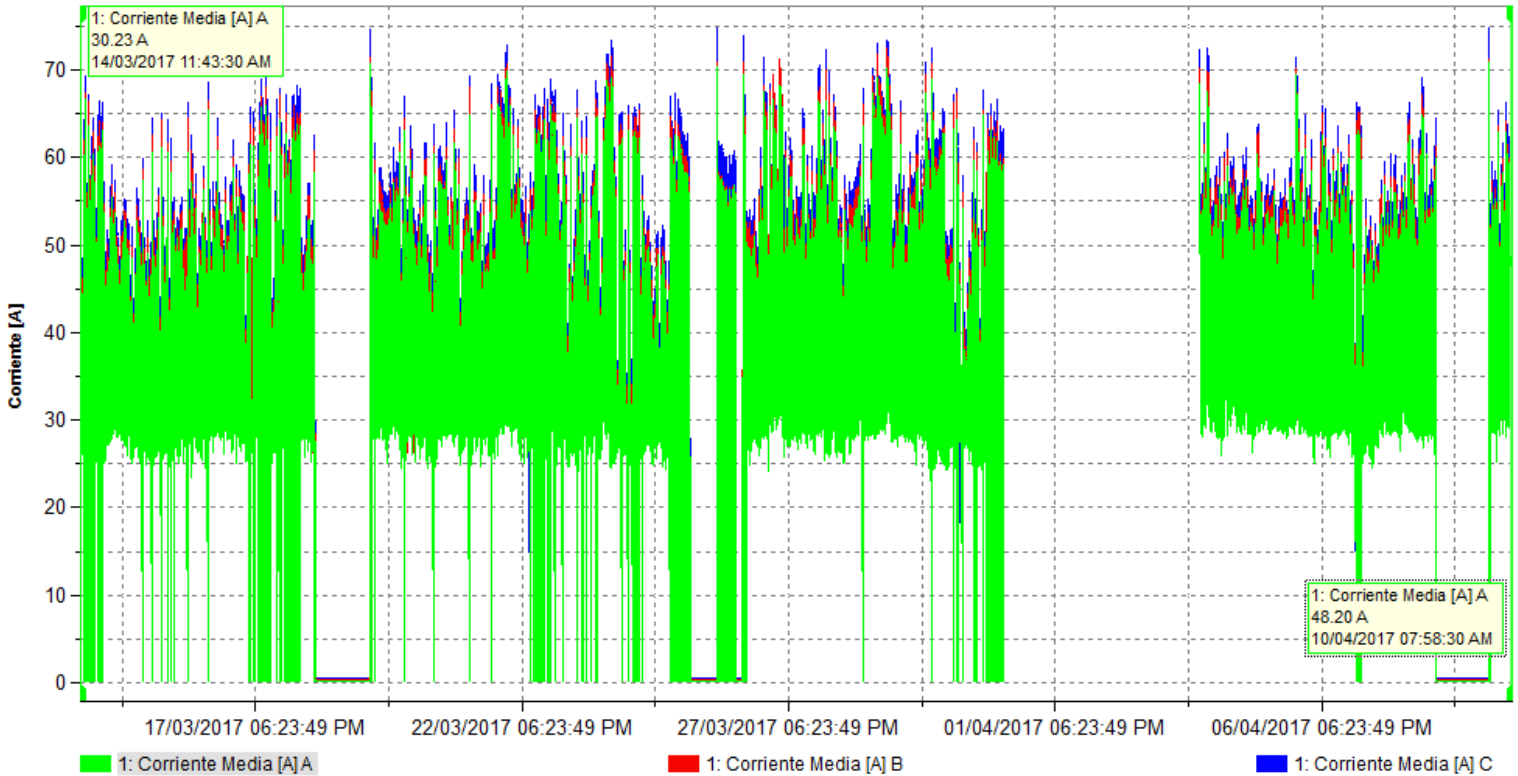


Figura 4.16 Gráfica de corriente según tiempo de las tres fases del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp

Fuente: Fluke Energy Analyze Plus 2.2

Es importante mencionar que del 31 de marzo al 4 de abril del 2017 el equipo se apagó debido a que uno de los técnicos bajó uno el breaker que alimentaba el toma-corriente donde está conectado el equipo por motivos que tenía que realizar un trabajo, y desconocía que el equipo estaba energizado por el mismo breaker.

De la información que se puede rescatar de la toma de datos de corrientes es que es importante seguir el control de la corriente ya que en la fase C la tendencia es a un desbalance de corriente. Lo cual puede ser causa de conexiones flojas, posible desbalance de voltajes en las fases, sobrecarga de alguna de las fases del circuito trifásico, por lo tanto, es recomendable seguir revisando la corriente y que el desbalance no sobrepase el 5% de la carga de servicio o el 10% a plena carga. (Franklin Electric, 2017)

Corriente [A]	A	B	C
Máx	71.13* A 09/04/2017 09:20:30 PM	72.51* A 29/03/2017 02:46:00 PM	75.03* A 09/04/2017 09:20:30 PM
Media	31.32** A	33.03** A	34.39** A
Min.	0.12* A 19/03/2017 09:39:20 PM	0.34* A 09/04/2017 02:03:40 PM	0.41* A 31/03/2017 01:08:40 PM

Figura 4.17 Informe de los datos medidos en el compresor de tornillo

Fuente: Fluke Energy Analyze Plus 2.2

En el caso del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp el desbalance alcanza apenas un 4%, lo que significa que no ocurre algún problema, pero es recomendable mantener el monitoreo.

De la Figura 4.17 es importante rescatar de las mayores corrientes en la fase A y C ocurre en el periodo nocturno, por lo tanto, el consumo de potencia es más económico. Además, que el promedio en los 26 días medidos es que la corriente medie de las fases en promedio 33 A, lo que quiere decir que en la mayoría del tiempo el compresor no se trabaja en un 100%.

Como se mencionó anteriormente, el uso de señales también puede funcionar para coordinar planes de ahorro de energía, donde se puede observar en cuales períodos de la tarifa de media tensión los equipos están consumiendo más, y como coordinarlos para que la-mayor-carga-ocurra-en-el-período-nocturno-la-cual-es-más-económica.

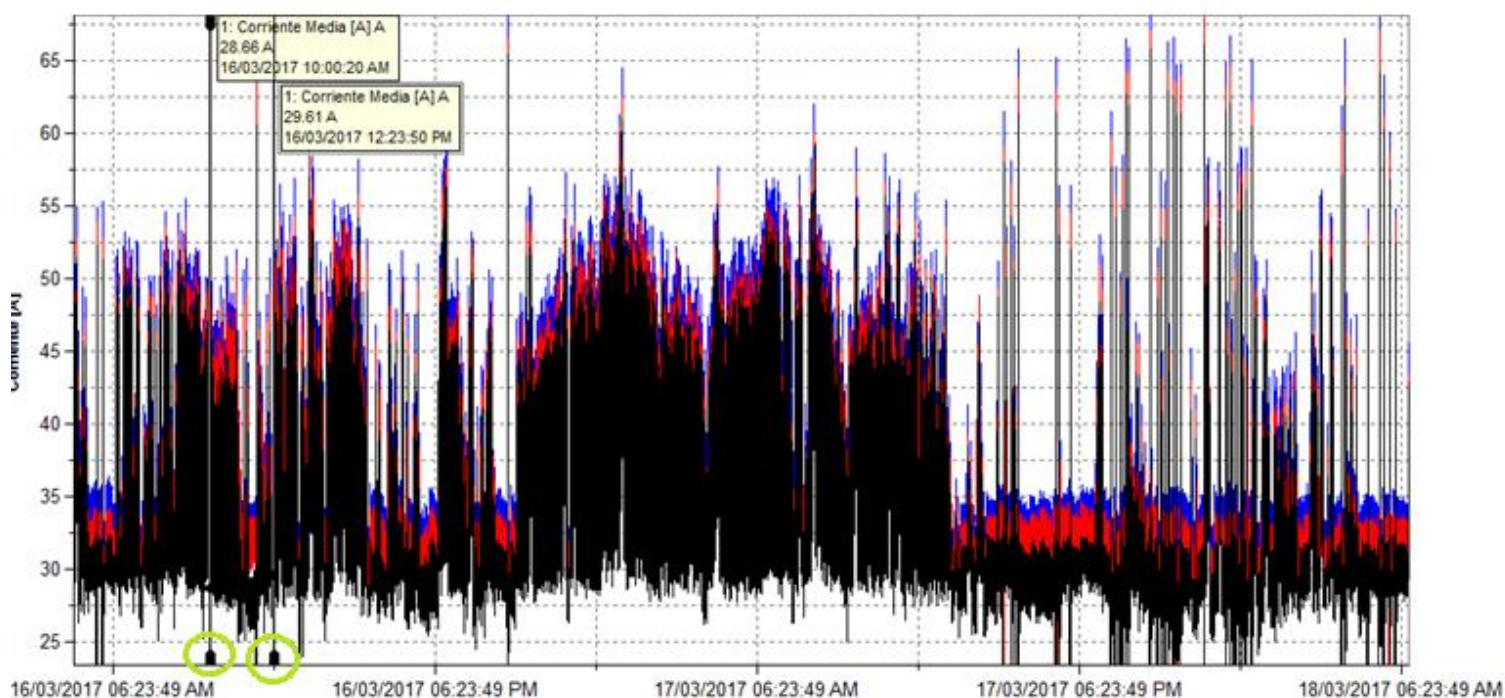


Figura 4.18 Gráfico de Corriente versus Tiempo de las tres fases del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp

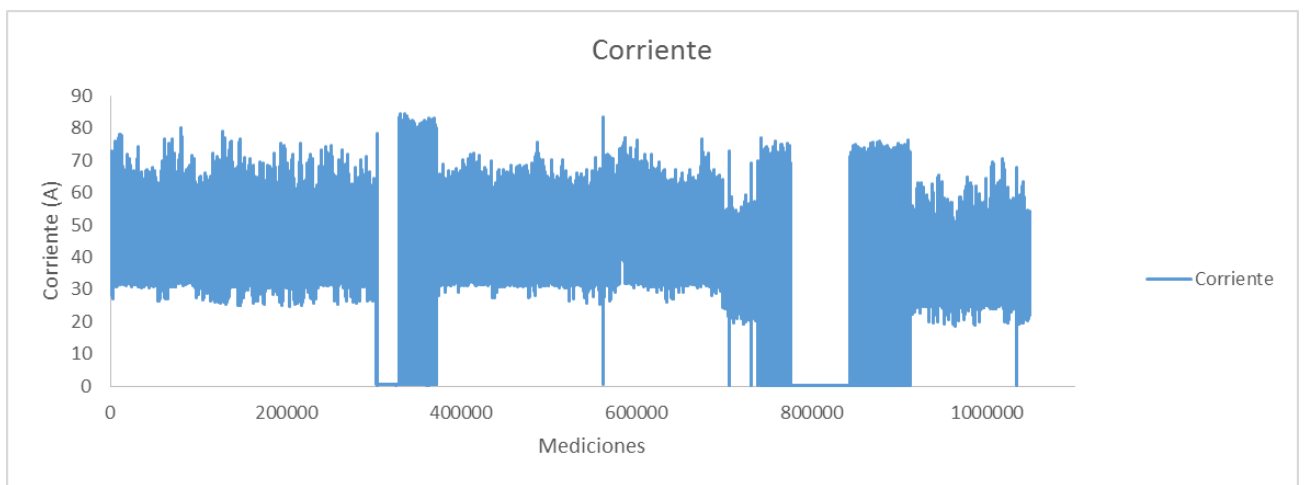
Fuente: Fluke Energy Analyze Plus 2.2

Se puede observar cómo mediante en la Figura 4.18 se representa el período punta donde el compresor no trabaja a grandes cargas como si lo hace en el periodo nocturno del 17 de marzo, se puede ver en la figura que es más constante una alta carga en ese periodo. Además, en el periodo punta de 10 am a 12:30 md, del mismo día, se puede observar como el compresor trabajó con bastante carga y alrededor de las 1 pm el equipo comienza a modularse y reducir el consumo de corriente, si se aplicaría un plan correcto de ahorro energético el equipo debería de haber detenido o disminuido en el período punta y trabajar más en los períodos valle o nocturno del mismo día, evitando la tarifa más alta.

4.1.10.1.2 Datos del sensor de corriente SCT -013-100 del Arduino

Debido a los datos obtenidos por el Fluke 1730 en la fase C se decidió medir esta con el sensor del Arduino, ya que es la que presenta un pequeño síntoma de desbalance. La idea es verificar el comportamiento del compresor.

La medición se inició el 18 de abril del 2017 a las 10 30am y se finalizó el viernes 7 de mayo a las 11 am, en la siguiente



Gráfica 4.4 Medición de Corriente mediante el sensor de arduino SCT-030-100

Fuente: Elaboración propia (Excel 2013)

En promedio la corriente determinada es de 31 A en la fase C, esto se comprueba con los datos analizados con el datalogger Fluke, por lo tanto, se analizó la misma variable con dos equipos distintos consiguiendo resultados muy aproximados.

Es recomendable medir la corriente en las tres fases, para verificar si existe desbalance en las fases.

4.2 Propuesta de Pronóstico

4.2.1 Modelo Probabilístico Propuesto

El fin del modelo probabilístico es determinar de manera matemática la probabilidad de que ocurra una falla, es decir, que tan propenso es que el equipo falle. Se va a utilizar el modelo de Weibull, donde se va a determinar la probabilidad de que un equipo falle.

Al no tener mucha información sobre datos de mantenimiento, y además de que las veces que ha fallado el equipo han sido muy pocas es muy difícil poder aplicar un método, pero se va a proponer el uso del método probabilístico basado en Weibull. Además es importante mencionar que se utiliza este método ya que el grado matemático para utilizarlo no es muy complicado, además, los autores (Haddad, Sandborn, & Pecht, 2015) recomiendan el método para realizar el pronóstico, como una forma útil de estimar probabilidades de falla.

A continuación se muestra los aspectos necesarios para poder aplicarlo, cuando se quiere conocer

- Es necesario guardar las horas de cuándo se cambie los filtros de aceite y del aire.
- Poseer la información de la cantidad de filtros que se cambien al año, siguiendo las recomendaciones del fabricante de alcanzar la caída de presión y no cambiarlos según lo indicado por el proveedor.
- Además, seguir el procedimiento del ejemplo mostrado en la sección del marco teórico.

Si se quiere determinar el tiempo promedio de alguna rutina de mantenimiento se debe de:

- Almacenar los minutos que dura la rutina, es necesario que la rutina se mantenga constante, es decir, no estarla cambiando.
- Para comenzar con el muestreo se recomienda mantener alrededor de 10 mediciones, y luego seguir almacenando la información
- Utilizar el ejemplo mostrado en la sección del marco teórico.

Como parte del proyecto, se va a dejar una hoja de Excel con el fin de facilitar la introducción de datos.

4.2.2 Rutinas de mantenimiento basado en la condición del equipo

Para poder comenzar las rutinas de mantenimiento basado en la condición del equipo como primer paso se va a tomar como referencia los valores límite entregados por el fabricante del compresor y no por el proveedor, ya que el negocio de este último es vender el mantenimiento de los equipos, por lo tanto, reducen a la mitad el tiempo de vida de los repuestos, con el fin de disminuir el tiempo de mantenimiento, y así vender más rutinas al año, provocando el incremento de los costos de mantenimiento.

Además, se busca utilizar unos de los elementos del PHM que es el RUL (Remaining Useful Life) en su traducción al español es Vida Útil Restante, la cual busca que se utilicen los componentes lo máximo posible, sin crear desperdicio.

4.2.2.1 Filtro de aceite del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp

Según proveedor este filtro se debería de cambiar cuando la caída del mismo sea mayor a 0,9 bar, el proveedor lo está cambia cada 2000 horas máquina donde la caída de presión registra hasta el último mantenimiento realizado es de 0,1 bar, por lo tanto, se está cambiando muy rápido el filtro lo que provoca un sobre mantenimiento de alrededor de un 5 veces más de los necesario al año esto se puede comprobar gracias a los sensores que posee el compresor, como se observa en la sección de recolección de datos. Entonces como recomendación del proyecto realizado es continuar usando los filtros lo máximo posible, cambiarlo cuando falte poco para alcanzar lo recomendado según lo indicado por el fabricante.

4.2.2.2 Filtro de aire del compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp

Sucede la misma situación que en el filtro de aceite, está cambiando sin utilizar los sensores del compresor, por lo tanto, el proveedor lo está cambiando cada 2000 horas, cuando en realidad según fabricante se debería de cambiar cuando la caída de presión es de 0,07 bar, en el último mantenimiento realizado en mayo de 2017 la caída de presión en el filtro era de 0 bar, lo que no existía necesidad de ningún cambio.

4.2.2.3 Temperatura de rodamientos en el compresor.

Según fabricante no existe ningún problema con los rodamientos si estos no sobrepasan los 77 °C de temperatura y si la presión de aceite dentro de ellos no se reduce en menos de 1,2 bar, actualmente nunca se le ha realizado ningún mantenimiento a los rodamientos, pero es muy útil y recomendado continuar midiendo las variables físicas para monitorearlos.

Para el cambio de los filtros se va a recomendar cambiarlos cuando la caída de presión sea la más cercana a la recomendada por el fabricante, con el fin de mantener la confiabilidad actual pero a un menor costo, además como nunca se ha realizado, se va a recomendar aproximar los mantenimiento de los dos filtros ya que así no sería necesario que el proveedor del servicio se desplace dos veces y cobrar más caro. Luego, mediante el modelo probabilístico determinar el tiempo que probabilidad de falla del equipo, y así establecer la proyección del cambio de los filtros.

4.3 Análisis económico del proyecto

A continuación se muestra la tabla con el análisis económico del proyecto, se utiliza un período de tres años para obtener ganancias de proyectos, y conocer viabilidad del proyecto.

Tabla 4.3 Flujo efectivo del proyecto

Año	0	1	2	3
Ahorro repuestos	₪-	₪643,632.56	₪643,632.56	₪643,632.56
Inversión del Proyecto				
Mano de obra práctica profesional	-₪761,544.00	₪-	₪-	₪-
Termogram (vibraciones y termo-grafía)	-₪256,050.00	₪-	₪-	₪-
Arduino	-₪66,400.00	₪-	₪-	₪-
FNE(Flujo neto de efectivo)	-₪ 1,083,994.00	₪643,632.56	₪643,632.56	₪643,632.56
VA(Valor Neto Actual)		₪585,120.51	₪531,927.74	₪483,570.67

Fuente: Elaboración propia (Excel 2013)

Para realiza el análisis económico se obtiene una tasa de descuento también conocida como TREMA de un 10% según (Ross, Westerfield, & Jaffe, 2012), ya que en la empresa el departamento financiero indicaron que no se posee un tasa exacta para evaluar proyectos.

Del flujo de efectivo realizado se obtiene que se posee un VAN de ¢ 516.624, 91 lo cual corresponde la ganancia del proyecto en valor actual. Además de una tasa de retorno de un 36%, la cual es mayor a la tasa de descuento, lo que quiere decir que se obtiene el retorno según la tasa de descuento planteada, es decir, se recupera la inversión y también se obtiene ganancias.

Tabla 4.4 Índices económicos de evaluación de proyectos

Valor Netos Actuales	¢1,600,618.91
Tasa de descuento	10.00%
VAN	¢516,624.91
TIR	36%

Fuente: Elaboración propia (Excel 2013)

Según el análisis económica se obtiene un retorno de la inversión en aproximadamente en dos años, es importante mencionar que no se toma en cuenta la reducción por mano de obra, ya que al ser menos actividades realizadas por el proveedor del servicio se debe de reducir la misma, además, tampoco se ve reflejado directamente la ayuda en la disminución de paros, y la aprobación de la auditoría del departamento de Facilidades para optar por la certificación ISO 9001.

Tabla 4.5 Período de Recuperación

Periodo de Recuperación	Inversión	Valor Recuperado	Valor Actual	Porcentaje recuperado
1	-¢1,083,994	¢585,120.51	-¢498,873	54.0%
2	-¢498,873	¢531,927.74	-¢33,054	103.0%
3	¢33,054	¢483,570.67	¢516,625	148%

Fuente: Elaboración propia (Excel 2013)

5 Bibliografía

- Barajas, L., & Srinivasa, N. (2008). *Real-time diagnostics, prognostics health management for large-scale manufacturing maintenance systems* . ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference.
- Catalán, J. (2007). *Metodologías y criterios de mantenibilidad aplicados a la organización y planificación del proceso de mantenimiento de equipo electrónico de impresión*. Guatemala: Universidad de San Carlos Guatemala.
- Duffua, S., Raouf, A., & Dixon, J. (. (2002). *Sistemas de mantenimiento: Planeación y Control*. Limusa.
- Franklin Electric. (2017, Abril 17). *Noticias del Mercado*. Retrieved from <https://franklinlinkmx.wordpress.com/2014/01/16/desequilibrio-en-el-suministro-trifasico/>
- González, J. (2017, Abril 05). Fotografía en sitio. Cartago, Cartago, Costa Rica.
- Google . (2017, Marzo 24). *Google Maps*. Retrieved from <https://www.google.com/maps>
- Guillén, A., Crespo, A., Gómez, J., & Guerrero, A. (2014). *Towards the Industrial Application of PHM: Challenges and Methodological Approach*. Sevilla: University of Seville, Department of Industrial Management.
- Haddad, G., Sandborn, P., & Pecht, M. (2015). *Using real options to manage condition based maintenance enabled by PHM*. Maryland, USA: Universidad de Maryland.

- Ly, C. T. (2009). *Fault diagnosis and failure prognosis for engineering systems: A global perspective*. IEEE.
- Murillo, W. (2017, Abril 24). *RCM Ingeniería, Confiabilidad y análisis estadístico para la predicción de fallas, seguridad, riesgo, costo y garantía de los equipos*. Retrieved from <https://es.slideshare.net/JesusTrujillo1/weibull-analisis-para-prediccion-de-fallas-ver1>
- NaylampMechatronics. (2017, Marzo 30). *Tutorial Arduino y memoria SD y micro SD*. Retrieved from http://www.naylampmechatronics.com/blog/38_Tutorial-Arduino-y-memoria-SD-y-micro-SD-.html
- Okoh, C., Roy, R., Mehnen, J., & Redding, L. (2014). *Overview of Remaining Useful Life Prediction Techniques in Through-Life Engineering Services*. Cranfield, United Kingdom: ELSERVIER.
- Park, A. (2001). *Manual del Ingeniero de Mantenimiento*.
- ProfiMessage Delphin. (2016). *Hardware Manual, ProfiMessage-Installation and start up*. Gladbach, Alemaniaia.
- Romero, E. (2012). *Estudio de mejora del mantenimiento mediante la aplicación de la distribución de Weibull a un histórico de fallos*. Germania: Fundación Uned.
- Ross, S., Westerfield, R., & Jaffe, J. (2012). *Finanzas Corporativas*. Ciudad de México: McGraw Hill.

- Sandborn, P. A. (2007). *A maintenance planning and business case development model for the application of prognostics and health management (PHM) to electronic systems. Microelectronics Reliability.*
- Singh, S., Galar, D., Baglee, D., & Sten, E. (2014). *Self-maintenance techniques: a smart approach towards self-maintenance system.* Sunderland: Institute for Automotive and Manufacturing Advanced Practise.
- Tinga, T., & Loendersloot, R. (2014). *Aligning PHM, SHM and CBM by understanding the physical system failure behaviour.* Twente: University of Twente, Dynamics based Maintenance group.
- Vogl, G., Weiss, B., & Helu, M. 1. (2016). *A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing.* New York: Springer Science Business Media.
- Zapata, C. (2011). *Confiabilidad en Ingeniería.* Pereira, Colombia: Universidad de Pereira.
- Zollner Electronics. (2017, Febrero 8). *Zollner Electronics.* Retrieved from <https://www.zollner-electronics.com/>

6 Conclusiones

1. Se definió que las variables físicas de los equipos críticos a medir son: caída de presión en filtros, temperatura de entrada de aire al compresor, corrientes, voltajes, vibraciones y análisis de aceites, al menos cada 6 meses.
2. Se determinó el uso del equipo de recolección de datos marca Delphin, para la lectura y procesamiento de señales de los sensores que están colocados actualmente con el fin de establecer rutinas mantenimiento basadas en el estado del equipo.
3. Se valoró que el sistema, que actualmente posee el compresor, es apto para su correcto análisis para la predicción de fallas mediante el mantenimiento propio, ya que tiene los sensores necesarios para la correcta alerta de problemas.
4. Se estima que el retorno de la inversión del proyecto será aproximadamente en 2 años, además que el VAN del mismo es de ₡516.624,91 y su tasa de retorno de inversión es de 35% usando una tasa de descuento del 10%.

7 Recomendaciones

Para el proyecto realizado se van a realizar recomendaciones de aspectos que por motivos de tiempo o de alcance del proyecto no se ejecutaron.

1. Se recomienda seguir realizando el mantenimiento según la condición del equipo, hacer continuo uso de los datos generados por los sensores que posee el compresor, además de comenzar a buscar aplicar acciones predictivas como el uso de termografía, análisis de vibraciones, ultrasonido.
2. Continuar realizando monitoreo en línea de los demás equipos de Facilidades, con el fin de verificar el estado del equipo.
3. Aplicar el método de PHM para los equipos de producción siendo una metodología que va ayudar a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos
4. Invertir en equipo de predictivo, ejemplo la cámara termo-gráfica con la cual se puede utilizar tanto en los equipos de Facilidades como los de Producción, además, se puede usar en los planes de ahorro energético,
5. Se debe de recordar que el equipo al ser nuevo está en la mejor condición de operación, pero conforme avanza en el tiempo y en los ciclos de uso, es bueno seguir fortaleciendo los planes de preventivos como con metodologías como mantenimiento basado en la confiabilidad.
6. Seguir utilizando los indicadores de mantenimiento propuestos, ya que estos permiten conocer el estado del mantenimiento realizado en los equipos, justificar mayores gastos, o bien indicar mejoras.
7. Colocar sensores para el monitoreo en línea de las bombas de vacío y en las manejadoras de aire para así ejecutar la probabilidad de fallas.

8 Apéndices

8.1 Programación del Arduino

A continuación se muestra la programación utilizada en Arduino, además se va a mostrar el costo del dispositivo colocado, y fotografías de su colocación.

En la Figura 8.1 se puede observar la programación del sensor de corriente SCT-013-100, y además de la programación que se usó para almacenar información en una tarjeta micro SD. La idea inicial era dejar el equipo permanente y enviar la información al modem principal de la compañía, para que la señal fuera leída directamente de cualquier computadora conectada a la red interna de la empresa, pero luego se pensó en usar el dispositivo para monitorear otras máquinas. Es decir dejarlo en el compresor 2 meses y verificar datos, y luego analizar los datos, y si la tendencia se mantiene conectarlo a otra máquina, como por ejemplo las bombas de vacío.

Utilizando el programa IDE Arduino se desarrolló la programación de la tarjeta de Ethernet donde se usa la micro SD para guardar la información, luego en el script se puede cómo se desarrolla la programación del sensor de corriente, donde mediante las librerías que se encuentran en internet se puede programarlo. Se usó el script de www.naylampmechatronics.com para poder programar la SD, pero luego se le hicieron algunos ajustes.

```

#include <SD.h>
#include "EmonLib.h"           // Include Emon Library
EnergyMonitor emon1;         // Create an instance
double Irms;

File myFile;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Iniciando SD ...");
  if (!SD.begin(4)) {
    Serial.println("No se pudo inicializar");
    return;
  }
  Serial.println("inicializacion exitosa");
  if(!SD.exists("datalog.csv"))
  {
    myFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
    if (myFile) {
      Serial.println("Archivo nuevo, Escribiendo encabezado(fila 1)");
      myFile.println("Tiempo(ms),Potencia,Corriente");
      myFile.close();
    } else {

      Serial.println("Error creando el archivo datalog.csv");
    }
  }
  emon1.current(4, 60);       // Current: input pin, calibration.
  delay(100);
  I = emon1.calcIrms(1480); // Calculate Irms only
}
void loop()
{
  Serial.print("Nueva medida: ");
  myFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);//abrimos el archivo
  if (myFile) {

    Irms = emon1.calcIrms(1480); // Calculate I only

    Serial.print("Escribiendo SD: ");

    myFile.print(millis());
    myFile.print(",");
    myFile.print(I*110.0);
    myFile.print(",");
    myFile.println(I);

    myFile.close(); //cerramos el archivo

    Serial.print(millis());
    Serial.print(",");
    Serial.print(Irms*110.0);
    Serial.print(",");
    Serial.println(Irms);

  } else {
    Serial.println("Error al abrir el archivo");
  }
  delay(500);
}

```

Figura 8.1 Código de Arduino para el uso de sensor de corriente y almacenamiento en SD
Fuente: Elaboración propia (IDE Arduino,2017)

Se va a grabar datos cada segundo, ya que la carga del compresor no es constante, varía mucho en el tiempo.

8.1.1 Costo del dispositivo del Arduino

A continuación se muestra el costo total invertido para poder funcionar el sensor de corriente mediante el Arduino UNO.

Tabla 8.1 Costos de los materiales para la programación de Arduino

Materiales	Costos
Placa Arduino UNO	\$25,95
Shield Arduino Ethernet SD	\$23,28
SD 8gb	\$6,39
Sensor de Corriente	\$18,00
Placa Perforada	\$2,00
Resistencias, capacitor, conector hembra, condensador	\$1,10
Caja de Protección acrílico	\$3,00
Total (Dólares)	\$79,72
Total (Colones)	₡44,885.09

Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Es necesario indicar que solo se coloca un sensor de corriente, pero si se desea colocar los tres sensores para medir corriente en las tres líneas se debe de invertir en un total de 117,93 dólares o bien 66 392 colones. Lo cuales se consideran baratos respecto a dispositivos que se venden en el mercado que en promedio pueden andar en los 2500 dólares. La diferencia es que estos dispositivos sirven para otras funciones, pero si se quiere algo barato y útil el uso del Arduino es una gran opción.

8.1.2 Fotos de la colocación del Arduino y del sensor

El Arduino se coloca dentro del panel de alimentación del compresor. A continuación se muestra las fotos del Arduino dentro de la caja de acrílico.

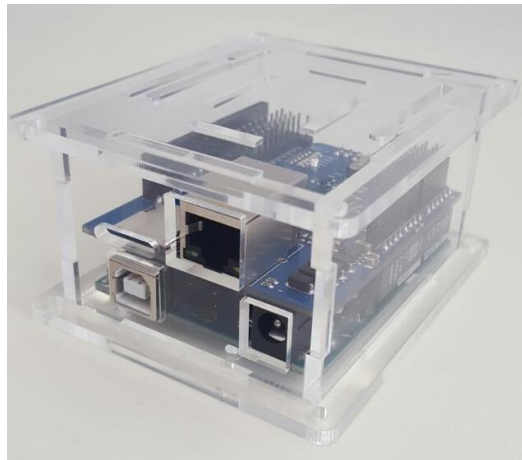


Figura 8.2 Arduino en la caja de acrílico

Fuente: González, J (2017)



Figura 8.3 Arduino y tarjeta ethernet en la caja de acrílico

Fuente: González, J (2017)

8.2 Fichas técnicas

En esta sección se muestra las restantes fichas técnicas realizadas para los equipos críticos de facilidades.



Ficha técnica de maquinaria

Máquina: Secador	Ubicación: Cuarto Mecánico
Fabricante: Ingersoll Rand	Sección: Facilidades
Modelo: NVG200A400	N° Serie: 5551990
Marca: Nirvana	

Características técnicas:

- Fuente de alimentación: 230/460 V, 60 Hz, 3 fases
- Consumo de potencia: 0,75 KW
- Presión: 240 psig

Funciones:

Quitar la humedad del aire que sale del compresor



Elaborado por: J.González, 2017

Figura 8.4 Ficha técnica del secador
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)



Ficha técnica de maquinaria

Máquina:	Bombas de Vacío	Ubicación:	Cuarto Mecánico
Fabricante:	Gardner Denver	Sección:	Facilidades
Modelo:	V-VC 303	Códificación:	CM-1-BDV-2
Marca:	Elmo Rietschle	N° Serie:	F1405075905

Características técnicas:

- Fuente de alimentación:
230-460 V /60 Hz/ 3 fases
- Potencia: 7 hp
- Aceite recomendado Multi-Lube 100



Funciones:

- Generar vacío para las máquinas de producción

Elaborado por: J.González 2017

Figura 8.5 Ficha técnica de la bomba 1
Fuente: Elaboración Propia (Excel 2013)

Es necesario indicar que como las 3 bombas son el mismo modelo al igual que la marca, se colocó una ficha técnica, ya que lo único que varía es el número de serie.

9 Anexos

9.1 Costos de mantenimiento del compresor

A continuación se muestran los costos relacionados al mantenimiento que se realiza al compresor aproximadamente cada 3 meses o según las horas cumplidas.

Código	COMPRESOR NIRVANA 60 HP	PRECIO Unitario \$	Cantidad	12000 HORAS Cada/3 MESES Noviembre 2016
<i>Numero Parte</i>	<i>Descripcion</i>	<i>Precio Unit.</i>	<i>Unidad</i>	<i>Costo \$</i>
22338115	FILTRO DE AIRE	194,25	1,00	194,25
54721329	PRE-FILTRO O PAD	35,32	1,00	35,32
39911615	FILTRO DE ACEITE	132,45	1,00	132,45
38035531	KIT DE ANALISIS DE ACEITE	115,13	1,00	115,13
40068389	ELEMENTO PRIMARIO	37,00	2,00	74,00
40068371	ELEMENTO SECUNDARIO	39,75	1,00	39,75
39491741	EMPAQUE CAJA RESPIRADERO	12,61	1,00	12,61
38459582	ACEITE ULTRA COOLAND (Cubeta 5 Galones	485,00	0,00	0,00
M.O.	MANO OBRA	300,00	1,00	300,00
	Totales \$			903,51

Código	ELEMENTO DE FILTRO DE LINEA MODELO F395IG	PRECIO Unitario \$	Cantidad	12000 HORAS Cada/3 MESES Noviembre 2016
<i>Numero Parte</i>	<i>Descripcion</i>	<i>Precio Unit.</i>	<i>Unidad</i>	<i>Costo \$</i>
85565745	ELEMENTO P/FILTRO DE LINEA F395IG	237,15	0,00	0,00
24335028	KIT AUTO-DREN PARA FILTRO F395IG (85568404 (old)	76,94	0,00	0,00
M.O.	MANO DE OBRA	10,00	0,00	0,00
			Total \$	0,00
			Total Anual \$	

Código	SECADOR MODELO NVC 200	PRECIO Unitario \$	Cantidad	12000 HORAS Cada/3 MESES Noviembre 2016
<i>Numero Parte</i>	<i>Descripcion</i>	<i>Precio Unit.</i>	<i>Unidad</i>	<i>Costo \$</i>
38446753	FILTRO AMBIENTE	81,87	1,00	81,87
M.O.	MANO DE OBRA	200,00	1,00	200,00
			Total \$	281,87
			Total Anual \$	

Figura 9.1 Costos de repuestos del mantenimiento del Compresor de 60 hp marca Ingersoll Rand para las 12 000 horas de trabajo

Fuente: Cummings Centroamérica (2017)

ITEM	Descripcion	Modelo	Serie	12000 HORAS Cada/3 MESES Noviembre 2016
ITEM	Descripcion	Modelo	Serie	Costo \$
1	COMPRESOR NIRVANA	IRN60IH	TA0054U15236	903,51
2	SECADOR NIRVANA	NVC200	551990,00	281,87
3	FILTRO DE LINEA	F395IG	N/A	0,00
Total \$				1185,38

TOTAL \$ MP 12000 HORAS	1185,38
TRABAJO EXTRA SABADO O DOMINGO	150,00
TOTAL NETO \$	1335,38

Figura 9.2 Costos totales de mantenimiento del compresor mes de febrero, 2017 (12000 horas de trabajo)

Fuente: Cummings de Centroamérica (2017)

9.2 Análisis de aceite

A continuación se muestra el último análisis de aceite entregado por la compañía encargada de realizar los análisis, la compañía es la misma que fabrica los compresores, por lo tanto, se recomienda contratar por lo menos una vez el análisis de aceite a otra compañía, con el fin de comparar los resultados.

En la Figura 9.3 se puede observar el último análisis de aceite entregado por la empresa, donde se puede ver que el aceite está en buenas condiciones, no posee altos índices de elementos y no existe ninguna alerta dada por la compañía que genera el informe. Se posee un registro de los análisis de más de un año, donde nunca ha presentado problemas, por lo tanto se recomienda disminuir la cantidad de muestras realizadas al año, con dos sería suficiente y así evitar gastos innecesarios.



Fluid Analysis Report



Información de Cuenta	Información del Componente	Información de muestra
Número de cuenta: ITSLAB-0031-0069 Customer Name: ZOLLNER COAST RICA Service Location: DISTRIBUIDORA CUMMINS COSTA RI	Serial Number: TA00540U14236 ID Secundaria: Model Number: IRN60H-0F Unit Type: OIL-FREE ROTARY SCREW Fabricante: INGERSOLL RAND	Número de Huella: 16014P04189 Número de laboratorio: H-147125 Localización de Laboratorio: Houston Analista de Datos: FLG Tomada: 03-jul-2016 Recibido: 08-jul-2016 Completado: 09-jul-2016
Información de filtro	Información Misceláneo	Información del Producto
Tipo de filtro: Índice de Micrón: 0	Service Type: PREV MAINTENANCE Customer Service: 1-866-341-4367	Fluid Manufacturer: INGERSOLL RAND Fluid Name: SSR ULTRA COOLANT Grado de Viscosidad: CUSTOM GRADE
Comentarios: Los datos no indican ningún resultado anormal. Tomar una nueva muestra en el próximo intervalo de cambio;		

Muestra #	Información de muestra							Lubricant Health						Lubricant Health: Additives		
	Fecha de toma	Fecha de recibo	Tiempo de Aceite h	Tiempo de unidad h	Cambio de Aceite	Aceite Agregado galón	Cambio de Filtro	Viscosidad 40 °C cSt	Número de Acido mg KOH/g	Oxidación abs/cm	Nitración abs/0.1m m	pH	Karl Fischer ppm	Calcio ppm	Bario ppm	Fósforo ppm
NL	03-may-2012	04-may-2012			No	No	No	48.2	0.02	91	10	6.9	1402	5	732	0
1	N/A	22-oct-2015	2895	2895	No	0	No	49.0	0.08	96	10	7.1	1561	2	719	4
2	03-abr-2016	24-jun-2016	0	0	No	0	Si	49.6	0.01	104	13	8.0	3803	2	779	0
3	03-jul-2016	08-jul-2016	0	0	No	0	Si	49.2	0.01	92	11	8.9	2791	3	711	5

Muestra #	Mechanical Health																						
	Hierro	Cromo	Niquel	Aluminio	Cobre	Plomo	Estañio	Plata	Vanadio	Silice	Sodio	Potasio	Titanio	Molibdeno	Antimonio	Manganeso	Litio	Boro	Magnesio	Zinc	> 5 µm	> 38 µm	> 10 µm
NL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2	967	8	360
1	0	0	0	0	0	9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1581	14	590
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1146	10	427
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	3401	30	1269

Los comentarios son un consultivo y se basan en el supuesto de que la muestra y los datos presentados son válidos. Lubricante o ausencia de tiempo del componente limita la evaluación. Ninguna garantía expresada o implícita.

Comentarios	1	Contenido de Plomo EVIDENTE;
Históricos	2	Los datos no indican ningún resultado anormal. Tomar una nueva muestra en el próximo intervalo de cambio;

Figura 9.3 Análisis de aceite del compresor Ingersoll Rand 60 hp tomado en Julio del 2016
Fuente: Cummings Costa Rica (2017)

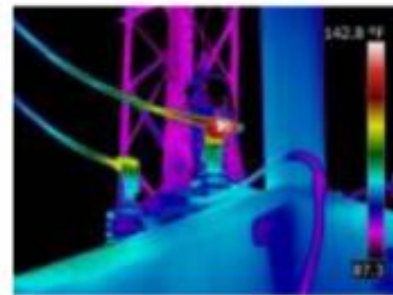
9.3 Cotización de Termogram

A continuación se muestra la cotización realizada por la empresa Termogram para las acciones predictivas solicitadas.

Cliente:	Zollner Electronics Costa Rica LTDA	Fecha:	02/05/2017	Vendedor:	
Proyecto:	Termografía y vibraciones	Forma de Pago:	100% Prepago		Jeremy Mata Arce
Contacto:	Luis Bonilla	Incoterms:	NA	Vence:	
Tel:	2550-5709	T. de Entrega:	Coordinar previamente		02/06/2017

Como proveedores de servicio, capacitación y equipo en el área de mantenimiento predictivo (mantenimiento basado en la condición), les presentamos una propuesta para efectuar trabajos de análisis por termografía IR en equipo eléctrico, mecánico y otros para distintos sistemas de su planta.

La termografía IR es una técnica de mantenimiento basado en la condición para la evaluación de problemas eléctricos (ej. falsos contactos, desbalances y otros), desgaste mecánico en equipo rotatorio (Ej. sobrecalentamientos producidos por desalineaciones, problemas de rodamientos, y daños en motores eléctricos) entre otros.



Propuesta Comercial

No.	Código	Descripción	Cant.	Precio Unitario	Desc.	Total
1	LAB-083	Servicio de Termografía a un compresor y tres bombas	1,000 00	\$300,00		\$300,00
2	LAB-065	Análisis de vibraciones a un compresor (No incluye bases de bronce)	1,000 00	\$150,00		\$150,00

Notas:		
Se debe solicitar el servicio con 15 días de anticipación. En caso de que sea cancelado sin previo aviso (2 días) se hará un recargo del 15% sobre el monto total de la cotización	Subtotal	\$450,00
	Descuento	
	Imp. Ventas	\$0,00
	Total	\$450,00

Figura 9.4 Cotización realizada por Termogram para acciones de mantenimiento predictivo
Fuente: Termogram Costa Rica (2017)

9.4 Cotización de la compañía Delphin

A continuación se muestra la cotización de la compañía Delphin para los dispositivos de análisis de vibraciones.



Delphin Technology AG | Lustheide 81 | 51427 Bergisch Gladbach

Zollner
electrical engineering
Mr. José Alejandro González
1st
30102 CARTAGO
Costa Rica

Tel: +50 68345-8807
Fax:
Email: josealegon@gmail.com

Quotation

No 17010485

Please state when ordering.

Date 05.04.2017

Sales prospect no 3771

Request no

Request date

Sales Dept. Wieland Brückner

wieland.brueckner@delphin.de

Extension for vibration measurement with ProfiMessage

Dear Mr. González,

We would like to provide you the required quotation and thank you for your interest in our products.

In the following you will receive a summary about the overall plan. You will find the technical specification on the next pages:

Pos.	Article	Unit price €	Qty.	Sum €
10	Hardware ProfiMessage (Slave)	4.481,00	1	4.481,00
20	Optional: Sensor supply decoupling	137,00	0	0,00
30	Optional: Voltage divider ST1	84,00	0	0,00
40	Optional: Software ProfiSignal Go 40	903,00	0	0,00
50	Packaging/Dispatch to Costa Rica	500,00	1	500,00
Total price				4.981,00

Conditions:

The General Conditions for the supply of products and services of the electrical and electronics industry as of January 2011 will be applied.

Pricing: EXW, excl. packaging/dispatch
Delivery date: after receipt of order approx. 1 week(s)
Dispatch type: UPS Standard
Payment: Payment in advance
Guarantee: on Delphin products 24 months; for purchase products the guarantee of the respective manufacturer will be applied
Validity: 17.05.2017

Figura 9.5 Cotización de la tarjeta de adquisidor de datos para vibraciones
Fuente: Delphin Technology Germany

Quotation 17010485

Pos.	Art. no Article		Unit price €	Qty.	Total €
10	42021	Hardware ProfiMessage (Slave) consisting of:	4.481,00	1	4.481,00
10.1	31020-GSLP	ProfiMessage-Slave device (GSLP) Slave device for ProfiMessage with 2 plug ins for I/O-modules. Slave devices can be connected to one master device (GBDP). Master device and slave devices are connected via CAN Bus (2 wire connections), incl. 1 m CAN Bus cable.	947,00	1	
10.2	32150-AMDTV2	Module AMDT-V2 8 analog inputs, 14 Bit resolution, synchronous sampling, measuring range: ± 10 V to ± 156 mV, in binary steps, differential inputs, anti-aliasing, automatically adjusted by digital filter (DSP). Sample rate: max. 20 kHz, max. 8.192 samples/block. Total sample rate: max. 160 kHz samples/s. Measured data transfer rate: max 10.000 samples/s. Flexible triggering, digital filters, FFT-analysis, characteristics, 2 analog outputs, 12 Bit resolution, 0 ... 10 V, galvanic isolation for the complete analog part. 4 digital inputs, 3.5 ... 90 VDC (high level) galvanic isolation. 4 digital outputs, 50 VDC@2.5 A, galvanic isolation.	3.534,00	1	

Figura 9.6 Cotización de la tarjeta de adquisidor de datos para vibraciones especificación técnica
Fuente: Delphin Technology Germany

En la Figura 9.6 se puede observar que el costo del módulo que se conecta al esclavo es el más costoso de la propuesta, en la empresa ya se posee un esclavo pero ya tiene conectado dos módulos, por lo tanto, es recomendable comprar un esclavo más ya que así no sería necesario quitar uno de los módulos que ya se poseen.

En la Figura 9.7 se muestra la cotización de dispositivo Expert Vibro, el cual es un analizador de vibraciones a los cuales se deben de comprar los sensores de vibraciones por aparte, lo cual incrementaría el costo de la propuesta.



Delphin Technology AG | Lustheide 81 | 51427 Bergisch Gladbach

Zollner
electrical engineering
Mr. José Alejandro González
1st
30102 CARTAGO
Costa Rica

Quotation

No 17010487

Please state when ordering.

Date 05.04.2017

Sales prospect no 3771

Request no

Request date

Sales Dept. Wieland Brückner

wieland.brueckner@delphin.de

Tel: +50 68345-8807
Fax:
Email: josealegon@gmail.com

8 channel vibration measurement for continuous measurement

Dear Mr. González,

We would like to provide you the required quotation and thank you for your interest in our products.

In the following you will receive a summary about the overall plan. You will find the technical specification on the next pages:

Pos.	Article	Unit price €	Qty.	Sum €
10	Expert Vibro 8 (4 GB)	6.312,00	1	6.312,00
20	Optional: Software ProfiSignal Go 40	903,00	0	0,00
30	Packaging/Dispatch to Costa Rica	500,00	1	500,00
	Total price			6.812,00

Conditions:

The General Conditions for the supply of products and services of the electrical and electronics industry as of January 2011 will be applied.

Pricing: EXW, excl. packaging/dispatch

Delivery date: after receipt of order approx. 1 week(s)

Dispatch type: UPS Standard

Payment: Payment in advance

Guarantee: on Delphin products 24 months; for purchase products the guarantee of the respective manufacturer will be applied

Validity: 17.05.2017

Figura 9.7 Cotización del dispositivo Expert Vibro




Fuente: Delphin Technology Germany

Quotation 17010487

Pos.	Art. no Article	Unit price €	Qty.	Total €
10	35160-EV8 Expert Vibro 8 (4 GB) Independently functioning measurement data acquisition device with monitoring functions. Raw measurement data is transformed into meaningful characteristic values and spectra via software channels, filter functions and internal signal processing. The device is equipped with a data logger memory. T e c h n i c a l S p e c i f i c a t i o n s Analog inputs: 8 Signal conditioning: None, AC-coupling, IEPE Analog outputs: 4 Digital / frequency inputs: 4 Digital outputs: 8 Data storage: 2 GB – extendible up to 14 GB Signal conditioning: Filtering, integration, differentiation, spectra, characteristic values Characteristic values: Diverse, from time and frequency ranges Interfaces: - LAN (2 x 1000Base-TX), - PROFIBUS Slave (2 x according to DPV1) - CAN (2 x 2.0) - ModBus RTU/TCP - WiFi, UMTS, LTE (optional), Housing: Synthetic, colour RAL 5013 Mounting: DIN EN 50023 rail or screw mounting Dimensions: 218 x 89 x 125 mm (B x H x D) Signal connection: Clamps for cables with up to 1.5 mm ² Ø Power supply: 12 V ... 24DC, polarity protection Configuration: DataService Configurator software Included in delivery: ExpertVibro, Ethernet cabel (2.5m), CD, manual	6.312,00	1	6.312,00

Figura 9.8 Cotización de Expert Vibro especificación técnica
Fuente: Delphin Techology Germany

9.5 Correo sobre sensores del compresor

 **Jose Alejandro González Quirós** <josealegon@gmail.com> 4 may. (hace 6 días) ☆  




para Mario ▾

Buenas don Mario. Le escribo nuevamente de Zollner Costa Rica, quisiera saber si ustedes poseen toda la información de los sensores que posee el compresor de tornillo Ingersoll Rand 60 hp, como por ejemplo: los sensores de temperatura de rodamientos, temperatura de entrada al compresor, los de presión de entrada y salida del filtro de aceite. Necesito saber las especificaciones técnicas de todos, ya que el proyecto abarca el monitoreo en línea de los equipos, con la idea de lograr guardar la información en un datalogger.

También me gustaría conocer el costo del controlador XE-M, con la instalación y también la licencia para descargar el service tool.

Gracias de nuevo, y disculpe la molestia.
Quedo atento a su respuesta.
Saludos.

...

 **Mario Alarcon Morales** 4 may. (hace 6 días) ☆  

para mí ▾

Buenas tardes don Alejandro , en estos momentos yo me encuentro incapacitado por un pequeño accidente laboral que tuve pero yo le puedo ayudar a conseguir la información que usted necesita solo que en estos momento no tengo acceso al sistema de ingersoll rand , seria en el momento que ingrese de mi incapacidad , por otro lado le podemos ayudar con la cotización del controlador XE y su instalación , lo de la licencia no es posible porque actualmente está solo para técnicos certificados de los distribuidores de ingersoll rand y la información que se pueda descargar solo lo puede realizar un técnico certificado y no el cliente . saludos

From: Jose Alejandro González Quirós [mailto:josealegon@gmail.com]
Sent: jueves, 4 de mayo de 2017 10:57
To: Mario Alarcon Morales <mario.alarcon.morales@cummins.com>
Subject: Re: Consulta Compresor Ingersoll Rand 60 hp, Zollner Costa Rica.

Figura 9.9 Correo de comunicación con persona de Cummings