



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE ACTUALIZACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE
CORRIENTE CONTINUA (CC) ENTRE 50 Y 220 HP POR MOTORES DE CORRIENTE
ALterna (CA) TRIFÁSICOS, UTILIZANDO VARIADORES DE FRECUENCIA PARA
MÁQUINAS EXTRUSORAS DE PLÁSTICO E IMPLEMENTACIÓN EN EQUIPO CON MOTOR
DE 50 HP PARA EVALUAR LA MEJORA EN LOS INDICADORES CLAVES DEL
DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EN DOS EMPRESAS GUATEMALTECAS
DEDICADAS A LA MANUFACTURA DE PLÁSTICOS**

Berny Josué Collado López
Asesorado por el M.A. Ing. Edwin Estuardo Rodas Arreaga

Guatemala, mayo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE ACTUALIZACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA (CC) ENTRE 50 Y 220 HP POR MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA (CA) TRIFÁSICOS, UTILIZANDO VARIADORES DE FRECUENCIA PARA MÁQUINAS EXTRUSORAS DE PLÁSTICO E IMPLEMENTACIÓN EN EQUIPO CON MOTOR DE 50 HP PARA EVALUAR LA MEJORA EN LOS INDICADORES CLAVES DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EN DOS EMPRESAS GUATEMALTECAS DEDICADAS A LA MANUFACTURA DE PLÁSTICOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BERNY JOSUÉ COLLADO LÓPEZ
ASESORADO POR EL M.A. ING. EDWIN ESTUARDO RODAS ARREAGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIO	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Adolfo René Hernández Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE ACTUALIZACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA (CC) ENTRE 50 Y 220 HP POR MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA (CA) TRIFÁSICOS, UTILIZANDO VARIADORES DE FRECUENCIA PARA MÁQUINAS EXTRUSORAS DE PLÁSTICO E IMPLEMENTACIÓN EN EQUIPO CON MOTOR DE 50 HP PARA EVALUAR LA MEJORA EN LOS INDICADORES CLAVES DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EN DOS EMPRESAS GUATEMALTECAS DEDICADAS A LA MANUFACTURA DE PLÁSTICOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha de 15 de noviembre de 2015.

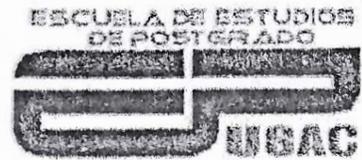


Berny Josué Collado López



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
 Facultad de Ingeniería
 Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226



AGS-MIMPP-0003-2016

Guatemala, 19 de enero de 2016.

Director:
 Ing. José Francisco González López
 Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
 Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Berny Josué Collado López** con carné número **2005 15893**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la Maestría de Ingeniería en Mantenimiento.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MA. Ing. Edwin Estuardo Rodas Arreaga
 Asesor (a)

Edwin Estuardo Rodas Arreaga
 Ingeniero Mecánico
 Colegiado No. 8647

Msc. Inga. Alba Maritza Guerrero Spinola
 Coordinadora de Área
 Gestión y Servicios

ALBA MARITZA GUERRERO DE LOPE
 INGENIERA INDUSTRIAL
 COLEGIADA No. 4611

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
 Directora Interina
 Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
 /ec



REF. EIME 44.2016.

Guatemala, 4 de MAYO 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: "DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE ACTUALIZACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA (CC) ENTRE 50 Y 220 HP POR MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA (CA) TRIFÁSICOS, UTILIZANDO VARIADORES DE FRECUENCIA PARA MÁQUINAS EXTRUSORAS DE PLÁSTICO E IMPLEMENTACIÓN EN EQUIPO CON MOTOR DE 50 HP PARA EVALUAR LA MEJORA EN LOS INDICADORES CLAVES DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EN DOS EMPRESAS GUATEMALTECAS DEDICADAS A LA MANUFACTURA DE PLÁSTICOS", presentado por el estudiante universitario Berny Josué Collado López, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

LEÍD Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Director

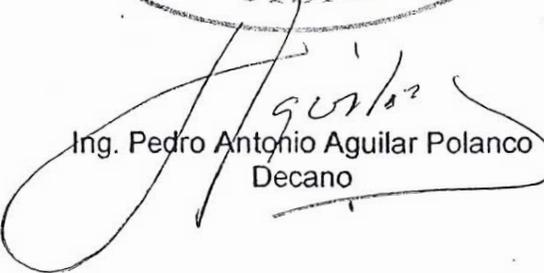
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE ACTUALIZACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA (CC) ENTRE 50 Y 220 HP POR MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA (CA) TRIFÁSICOS, UTILIZANDO VARIADORES DE FRECUENCIA PARA MÁQUINAS EXTRUSORAS DE PLÁSTICO E IMPLEMENTACIÓN EN EQUIPO CON MOTOR DE 50 HP PARA EVALUAR LA MEJORA EN LOS INDICADORES CLAVES DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EN DOS EMPRESAS GUATEMALTECAS DEDICADAS A LA MANUFACTURA DE PLÁSTICOS**, presentado por el estudiante universitario **Berny Josué Collado López** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, mayo de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme cumplir una meta más en mi vida, darme la fuerza de seguir adelante y guiarme en el camino.
- Mis padres** Jaime Collado y Rosaura López de Collado, por el apoyo y amor incondicional que me han brindado, acompañarme en cada paso y brindarme sus enseñanzas para llegar a una meta más.
- Mis hermanos** Pablo y Joseline Collado, por ser los confidentes y la mejor ayuda en mi vida.
- Mis amigos** Ericka Morales, Andrea Leche, Ramiro Toledo, Julio Rodas, Carlos Morales, Pedro Pablo Rivera, Luis Guerra, Pablo García, Axel Marín, Fernando Mansilla, Diego Mancilla y Pablo Del Valle (q. e. p. d.), por ser más que mis amigos, los hermanos que la vida me dio.
- Mis amigos de Universidad** Alejandra Maldonado, Mariano Gutiérrez, Pedro Estrada, Pedro Arriaga, Paola Turcios, Héctor Hernández, Misshell Corzo, Jenoveva Maldonado, Pablo Ríos, Susana Lizama, Juan Carlos Muñoz, José Zambrano, Luis Pérez,

Gary Cacao, Carlos Coguox, Rony Jucup y Raúl Girón, por todos los momentos vividos en la Universidad.

Mis amigos de carrera profesional

Luis Trabanino, Ulrich Segura, Silda González, Manuel Cazali, Jorge Estrada, Karla López, Andrés García, Carlos García, Diego García y Haroldo Dardon, por ser los compañeros en esta aventura de vida.

AGRADECIMIENTOS A:

La Tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme permitido formarme académicamente y crecer como profesional.
Facultad de Ingeniería	Por ser la casa que me brindó los conocimientos necesarios para ejercerlos en mi vida profesional.
A mi asesor	Edwin Rodas, por acompañarme y transmitir sus conocimientos en todo momento.
Oscar Cárcamo	Por ser el mejor guía de mi vida profesional.
Julio Estrada	Por compartir sus conocimientos y forjar las bases de mi carrera profesional.
Luis Fernando Dubón	Por tu ayuda incondicional y desinteresada en el transcurso de los años.
Martamaría Gamboa	Por ser apoyo en los momentos más oscuros de mi vida y ser un ángel en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
RESUMEN.....	V
INTRODUCCIÓN.....	VII
1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
2.1. Pregunta general.....	7
2.2. Preguntas específicas.....	8
3. JUSTIFICACIÓN	9
4. OBJETIVOS	11
5. ALCANCE	13
5.1. Mantenimiento industrial.....	14
5.2. Ingeniería de mantenimiento	15
5.3. Planeación de mantenimiento	15
5.4. Corriente eléctrica	16
5.5. Circuito de corriente directa.....	17
5.6. Circuito de corriente alterna.....	19
5.7. Potencia eléctrica	21
6. MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.....	25
6.1. Motores eléctricos	25

6.2.	Máquinas de corriente continua (CC).....	26
6.3.	Máquinas de corriente alterna.....	29
6.4.	Control de máquinas rotativas.....	31
6.4.1.	Variador de frecuencia	33
7.	ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	35
8.	METODOLOGÍA.....	39
9.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	41
10.	CRONOGRAMA	43
	BIBLIOGRAFÍA.....	47

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Núcleo de un transformador E-I y su circuito equivalente	18
2.	Generación de una onda sinusoidal de corriente alterna por medio de una armadura giratoria	20
3.	Circuito de corriente alterna RLC	20
4.	Triángulo de potencias	23
5.	Motor de corriente continua.....	27
6.	Máquina asíncrona.....	30
7.	Curva característica torque-velocidad del motor de inducción	31
8.	Cronograma	44

TABLAS

I.	Frecuencia de pruebas en motores de CC.....	4
II.	Recursos financieros.....	45

RESUMEN

Uno de los materiales de mayor auge desde 1995 son los plásticos. Esto con una gran diversidad de aplicaciones que se pueden encontrar casi en cualquier rama de la ciencia o de la vida común. Prácticamente en cualquier ámbito laboral se tiene la aplicación de materiales plásticos como base para la creación de miles de insumos útiles al ser humano. (Vera-Sorroche, y otros, 2014)

Uno de los procesos altamente utilizados en la fabricación y trabajo de los materiales plásticos es la extrusión. Este es un proceso mecánico, que por medio de calor y un flujo constante de material fundido se forman diversos tipos de formas y aplicaciones útiles en la industria.

Debido a las características de velocidad, control y torque de los motores de corriente continua (CC) utilizados en aplicaciones de movimiento donde dichas características se vuelven imprescindibles para el manejo de equipos de alta carga y velocidades predeterminadas o fijas. Aquí es en donde cualquier variación de las características puede ocurrir en cualquier momento, afectando el proceso o la calidad del producto, aún más grave, provocando una falla al equipo, tal como pudiera ocurrir en el proceso de extrusión de los plásticos.

Aunque los motores de corriente continua (CC) tienen grandes ventajas, sus características de funcionamiento hacen que su constitución sea muy complicada y con partes especializadas, lo que conlleva a un elevado costo de inventario (altos tiempos de almacenamiento y activos muertos en el tiempo) para el cual mantener el buen funcionamiento del equipo eleva los costos de la

gestión de mantenimiento, generando un grave problema en la administración del mantenimiento debido a que se requiere recursos adicionales para controlar la disponibilidad y confiabilidad de los activos, en las plantas dedicadas a la transformación de los plásticos, lo cual en resumen afecta directamente los indicadores claves del departamento de mantenimiento en áreas que contengan estos equipos.

INTRODUCCIÓN

En la revisión de costos de operación, el mantenimiento de los motores de corriente continua (CC) es el principal problema y el uso de los equipos que los tienen, reduciendo los recursos disponibles en la gestión de mantenimiento. Impacta de manera considerable los indicadores de mantenimiento en las organizaciones.

A consecuencia de las partes especializadas de los motores de corriente continua (CC) requieren el uso de diversos equipos auxiliares, como lo son ventiladores para enfriamiento tanto de los motores, así como de los elementos de control que tienen. Esto para complementar su óptimo funcionamiento, generando altos costos de operación al estar ligados todos a un consumo independiente de energía eléctrica. Los cuales son un problema, que mediante actualización de tecnologías los encargados de mantenimiento pueden disminuir notablemente, también por la implementación de sistemas de control automatizados empleados en nuevas tecnologías como los variadores de frecuencia con control de velocidad y torque.

Aunque los primeros ejemplos de control industrial se encuentran en la antigua Grecia, con los trabajos de tres mecánicos: Ktesibios, Philon y Heron, con sus diseños de un reloj de agua (Clepsydra), el sistema de regulación de nivel de aceite para una lámpara y la enciclopedia técnica que incluye los libros de “Neumática” y “Autómata” respectivamente. Durante la edad media se desarrollan mejores técnicas de implementación de sistemas de control, la tecnología sigue su evolución y desarrollo pasando por la Revolución Industrial, el control clásico, la teoría moderna de control, el computador en el control de

procesos industriales, los primeros autómatas y los automatismos industriales. (Piedrafita Moreno, 2004)

Desde la década de 1980 aparecen los primeros variadores de frecuencia. En 2015 con los grandes avances de la tecnología es posible realizar el cambio de los motores de corriente continua (CC) y reemplazarlos por motores de corriente alterna (CA). Esto utilizando variadores electrónicos de frecuencia y otros dispositivos para igualar sus características de operación.

Al referirse a variadores de frecuencia, los equipos que se utilizan en el control de la frecuencia eléctrica son definidos como autómatas programables. Desde principios del 2000 se han incorporado una gama de nuevas funcionalidades (funciones que han superado el concepto tradicional de controlador secuencial). Esto para realizar funciones especializadas como regulación de procesos continuos, modificación de la velocidad en línea, comunicación mediante redes industriales y con tecnologías de comunicación que desde 2000 sigue la tendencia a integrar los sistemas de comunicación clásicos en las redes informáticas, en los sistemas de automatización industrial por medio de Ethernet. Lo que pretende convertirlo en el estándar de la comunicación industrial, todo esto hace que sean la opción para utilizar en la actualización de tecnología de equipos industriales. (Piedrafita Moreno, 2004)

“Los microprocesadores están permitiendo el desplazamiento de los accionamientos de corriente continua por los de corriente alterna ofreciendo mejores prestaciones y a un precio similar”. (Piedrafita Moreno, 2004). Los microprocesadores en el 2015 son de vital importancia para el desarrollo y avance de los sistemas de control de procesos industriales y de las máquinas eléctricas.

En Guatemala se han materializado ninguna o pocas investigaciones y estudios sobre la actualización de tecnología de motores eléctricos de corriente continua (CC). Los cuales son necesarios para garantizar la funcionalidad y ventajas de realizar dicho cambio, es necesario verificar no solamente los aspectos técnicos necesarios para la operación sino tener en cuenta los factores económicos que garantizarán la sostenibilidad del proyecto de actualización de tecnología planteado.

Al realizar la actualización de tecnología planteada en el presente estudio, se pretende reducir al menos en un 30 % los costos directamente asociados al mantenimiento de los equipos con motores de corriente continua (CC), equipos auxiliares y sus sistemas de control. También se desea demostrar la mejora en los indicadores claves del Departamento de Mantenimiento, incrementando la disponibilidad, la confiabilidad, disminución del tiempo muerto y aumento de los recursos disponibles.

En el primer capítulo se realizará un recorrido por los conceptos básicos de utilidad en el estudio. Estos son indicadores claves de mantenimiento, impacto al medio ambiente de la actualización de tecnología de equipos, así como de las tecnologías actualmente en uso, actualización y reacondicionamiento de partes y equipos. Además de aplicación de normas en la actualización de equipos, análisis técnico del motor de corriente continua (CC), principales características y principales diferencias con los motores de corriente alterna (CA), la evolución en la aplicación de ambas tecnologías y el uso de estas en el proceso de extrusión de plásticos.

En el segundo capítulo se realizará un análisis técnico de todos los factores y recursos necesarios para realizar la actualización de la tecnología.

Así como las variables que influirán para actualizar la maquinaria de producción, las ventajas y desventajas que se obtendrán. Luego de realizar la actualización comparado con el uso de los equipos actuales se describirá el método y en general la conversión de corriente directa a corriente alterna, aplicaciones de la conversión de energía y las variables de control que influyen al realizar la conversión.

En el tercer capítulo se realizará un análisis eléctrico para evidenciar la ventaja de la actualización de tecnología por medio de análisis de circuitos y de variables eléctricas técnicas. Estas servirán para sustentar y verificar las ventajas económicas que representará el cambio.

En el cuarto capítulo se realizará el análisis financiero actual utilizando el motor de corriente continua (CC) con todos sus equipos auxiliares. Estos son: la experiencia que se ha tenido desde la instalación de los equipos, los historiales de gastos y compras, el inventario de bodega, para sustentar la actualización.

En el quinto capítulo se realizará el análisis financiero al realizar el cambio de tecnología, los gastos asociados al mantenimiento y operación con el motor de corriente alterna (CA) controlado con un variador de frecuencia. Todas estas variables se obtendrán luego de realizar el cambio en el equipo de 50 HP como referencia y también utilizando proyecciones para los equipos de mayor capacidad que comprende el estudio.

1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

En su artículo Carrión Nin (2000) explica que para el proceso de extrusión de plásticos se utiliza un dispositivo en forma de tornillo encerrado en una camisa con calor que derrite el plástico. El tornillo mueve de forma continua el plástico para llevarlo a su forma final saliendo por la matriz, impulsado por medio de un motor eléctrico. Siendo el motor eléctrico un elemento clave para el trabajo de la extrusión, generando el movimiento necesario para el movimiento del plástico fundido. (Carrion Nin, 2000)

Un motor eléctrico es una máquina rotativa que convierte energía eléctrica en energía mecánica tal como un par de torsión. Son dispositivos ampliamente utilizados en la industria por sus prestaciones y fácil manejo, existen dos tipos de motores eléctricos: los motores de corriente continua (CC) y los motores de corriente alterna (CA).

Los motores de corriente continua (CC) fueron las primeras máquinas de conversión de energía utilizadas en la industria. Desde los inicios del desarrollo de maquinaria y equipos según Stephen Chapman en 2005; teniendo de referencia que los motores de corriente continua (CC) fueron los primeros creados y desarrollados. Aunque aproximadamente desde la década de 1980 únicamente son utilizados en aplicaciones especiales; la especialización de las aplicaciones de los motores de corriente continua (CC) se debe a que los motores de corriente alterna (CA) básicamente tienen un diseño más sencillo por ende sus características son menores. (Chapman, 2005)

Entre las principales ventajas que se obtienen al utilizar los motores de corriente directa (CC), es la posibilidad de manejar su velocidad relativamente fácil. Esta es controlada directamente dentro de la bobina, además de su velocidad constante a pesar de los cambios de carga, (Linares-Flores, Antonio-García, & Orantes-Molina, 2010) también se obtiene un considerable par de torsión, aunque se tiene la desventaja clara de su compleja construcción y complicado sistema de trabajo.

Las principales razones por las que se han buscado soluciones para el reemplazo de los motores de corriente directa (CC) por motores de corriente continua (CA), son los costos de operación y mantenimiento. Según el artículo sobre reducción de costos por energía eléctrica para procesos de extrusión, Scott, (2005) menciona que el aumento del costo de energía es uno de los grandes retos que enfrenta la industria manufacturera de plásticos. Por ejemplo, en algunos lugares de Estados Unidos ha sido del 25 % en los últimos dos años, para ello se han utilizado variadores de frecuencia entre algunas de las opciones.

En el estudio de los efectos de la viscosidad de la mezcla y la eficiencia térmica para un extrusor de tornillo simple, Vera-Sorroche Javier, (2014) encontró que la programación de la temperatura y la velocidad de rotación del tornillo tiene una incidencia directa en el consumo de energía y la consistencia de la mezcla. El consumo de energía es un factor principal que se toma en cuenta cómo uno de las variables directas para el cálculo de los indicadores claves de mantenimiento (Key Performance Indicators, KPI).

Antes de introducir al concepto de los indicadores claves de mantenimiento es importante tener en mente la famosa frase, “No podemos controlar o administrar lo que no podemos medir” (William Thomson, Primer

barón de Kelvin), esto es principalmente la función de los indicadores, medir el desempeño del mantenimiento en una organización; un principio fundamental de cualquier administración es la medición. “Los indicadores de desempeño para el mantenimiento son seleccionados asegurando una correlación directa entre las actividades de mantenimiento y el indicador que se está midiendo” (Weber, 2005, p. 4). Los resultados que se obtienen de las mediciones pueden incluir costos, tiempos de baja de los equipos respecto a lo planificado y el número de fallas de los activos, tiempos de las fallas, entre otros.

En los distintos tipos de estrategias de mantenimiento disponibles, la elección de una correcta gestión contribuye en el total rendimiento de la planta de producción. Así como en los indicadores claves de mantenimiento, en cualquier empresa el mantenimiento se puede definir como una actividad llevada a cabo para asegurar la confiabilidad de las funciones de la maquinaria.

En su artículo Viveros Pablo, (2013) dice argumenta que un modelo de gestión de mantenimiento debe ser eficaz, eficiente y oportuno, se debe alinear a los objetivos impuestos con base en las necesidades de la empresa, minimizando los costos indirectos de mantenimiento, generando actividades que permitan mejorar los indicadores claves del proceso de mantenimiento. (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013).

En el desarrollo de aplicaciones, desde 2010 la solución más económica para la actualización de tecnología de los motores de corriente directa, se utiliza una combinación de motores eléctricos de corriente alterna con un controlador electrónico de velocidad, también conocidos como unidades de frecuencia variable (Electromaquinas, 2013).

Entre los grandes problemas que se han podido observar en dos empresas guatemaltecas (dedicadas a la extrusión de plásticos), ha sido el alto grado de complejidad y el alto costo de los trabajos de mantenimiento de los motores de corriente continua. La razón del alto costo se debe a la compleja estructura física de los motores, “Las pruebas eléctricas de motores eléctricos de corriente continua (CC) son un desafío para la industria, los fabricantes y los centros de reparaciones.” (Penrose, 2010, p. 9).

Tabla I. **Frecuencia de pruebas en motores de CC**

Tipo de prueba	No crítica	General	Crítica
Mantenimiento general	Cada 1 año	Cada 6 a 9 meses	Cada 3 a 6 meses
Mantenimiento predictivo	Cada 6 meses	Cada 3 meses	Mensualmente
Prueba de armadura	Cada 1 año	Cada 6 meses	Cada 3 meses

Fuente: AI-TEST Pro, LLC. *Pruebas en motores*. p. 8.

Se observa en la tabla 1, que la frecuencia de realización de rutinas de mantenimiento es bastante elevada, provocando costos altos y baja disponibilidad de los motores de corriente continua.

Debido a las complicaciones que se dan en las rutinas y trabajos necesarios en el mantenimiento de los motores de corriente continua (CC), los costos de realizar un correcto y adecuado plan de mantenimiento a los motores son extremadamente altos. Por ello es necesario mantener un alto *stock* de repuestos tanto consumibles, como lo son los carbones o escobillas, así como críticos, como lo son los tacómetros, controladores de mando y otros.

“Las razones por las cuales hacemos mantenimiento pueden ser resumidas en las siguientes categorías (en base a los beneficios logrados):

- Prevenir o disminuir el riesgo de fallas
- Recuperar el desempeño
- Aumentar la vida útil/diferir inversiones

- Seguridad, ambiente y aspectos legales
- Factor brillo” (Durán, 2003, p. 21-22).

Una de las razones principales de la lista anterior es la disminución de los costos directos de las organizaciones. Debido a que las fallas de cualquier equipo resultan en costos muchas veces más elevados que el de tener una buena gestión de mantenimiento, sin contar de los daños que se puedan causar al ambiente, la violación del marco legal o el daño a la seguridad física de los colaboradores.

“La metodología diseñada toma en cuenta las incertidumbres relacionadas a las variables requeridas para la determinación de los costos asociados a las actividades de mantenimiento o reemplazo; así como para la determinación del riesgo asumido en caso de la ocurrencia de eventos no deseados como consecuencia de la no ejecución de dicha actividad de mantenimiento o reemplazo, lo que permite al tomador de decisiones evaluar los escenarios posibles a lo largo del ciclo de vida del activo, garantizando la rentabilidad del negocio” (Gutiérrez Urdaneta & Romero Barrios, 2014, p. 1).

Todas las desventajas se eliminan al realizar cambio de los motores de corriente continua (CC) a motores de corriente alterna (CA). Esto por medio de la actualización de tecnologías para lograr los mismos resultados.

Es importante tomar en cuenta que para realizar la actualización de tecnología se debe tener un sistema de control automatizado y de la capacidad de control necesaria. Esto para que el motor de corriente alterna (CA) pueda realizar las mismas funciones y con las mismas características de operación que el motor de corriente continua (CC). Este control se puede llevar a cabo utilizando un autómatas programable en este caso un variador de frecuencia de corriente alterna.

Automatizar algún proceso es hacerlo más eficiente. Generalmente los procesos tienen muchas variables, por esto la necesidad de sistemas de control, algunas de las razones por las que estos sistemas surgen son:

exigencias del mercado, cambios continuos, mejora de la productividad, mejorar la calidad de los productos, disminución de costos y supervisión de equipos y protecciones.

El proceso de automatización de los procesos productivos tiene como objetivo mejorar la eficiencia económica, disminuyendo los costos directos, como la mano de obra, por medio de pequeñas inversiones e implementaciones. “El crecimiento económico de los países genera un círculo virtuoso para su desarrollo, lo que obliga a la automatización de los procesos industriales”. (Vilaboa B., 2004, p. 35).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la gestión de mantenimiento de máquinas de extrusión de plásticos se ha podido detectar que el principal problema, se debe a los altos costos de mantenimiento y de operación de los motores de corriente continua (CC). Los costos no solo afectan al departamento de mantenimiento, sino que influye grandemente en el costo de producción o costo del producto terminado. Esta acción provoca la reducción de recursos necesarios para la gestión de mantenimiento, la disponibilidad de tiempo del personal de mantenimiento, los recursos para otros proyectos de mejora y rentabilidad del proceso.

El problema al pasar del tiempo será más complicado. Esto debido a que el envejecimiento de los dispositivos provoca una mayor recurrencia de fallas y poca disponibilidad de repuestos, lo que se solucionaría con la actualización de tecnología. Al utilizar la solución más económica a la que se tiene acceso los variadores electrónicos de frecuencia en conjunto con motores de corriente alterna son la opción de mayor avance, desarrollo y utilización en el 2015.

2.1. Pregunta general

¿Cuáles serán los beneficios al realizar una actualización de tecnología de motores de corriente continua (CC) de 50 a 200 Hp a un motor de corriente alterna (CA), con variador de frecuencia y como se relacionan las características del cambio con dichos beneficios?

2.2. Preguntas específicas

- ¿Qué se necesita para realizar el cambio del motor de corriente directa (CC) por un motor de corriente alterna (CA) con variador de frecuencia?
- ¿Cuáles son los costos actuales que se tienen debido al mantenimiento y la operación de las máquinas de extrusión de plásticos utilizando motores de corriente continua (CC)?
- ¿Cuáles serán los gastos después de que se realice el cambio de tecnología de un motor de corriente continua (CC) por un motor de corriente alterna (CA) utilizando un variador de frecuencia para el control?
- ¿Al realizar la actualización se logrará la meta de reducir los costos de operación y mantenimiento, manteniendo la calidad y disponibilidad de los equipos de producción?

3. JUSTIFICACIÓN

El tema del presente estudio se encuentra en la línea de investigación administrativa en el área de administración de mantenimiento y subárea de costos y presupuestos. Aunque se han realizado cambios de los sistemas de extrusión de plásticos y de los servicios auxiliares requeridos para la operación de los motores de corriente continua (CC) que se utilizan en el proceso, no se han logrado disminuir de manera significativa los costos por mantenimiento, inventario de repuestos y los asociados a la operación.

Debido a los altos costos se hace evidente la necesidad del cambio de los motores de corriente continua (CC) para disminuir los problemas identificados y que son directamente relacionados a los elevados costos de mantenimiento y operación. Aunque con el cambio se presentarían complicaciones debidas las diferentes propiedades de los motores de corriente directa (CC) y de los motores de corriente alterna (CA).

Para eliminar las diferencias se necesita actualizar los equipos con nuevas tecnologías tales como variadores electrónicos de frecuencia. Estos son la solución más económica, de mayor desarrollo y utilización actual. Haciendo evidente la utilidad del presente estudio ya que brinda las características necesarias para realizar el cambio, los costos actuales y los costos propuestos para realizar una comparación.

Al realizar el cambio de tecnología de motores eléctricos, en el proceso de extrusión, se pretende lograr una reducción de costos tanto en la operación como en el mantenimiento general del proceso. Así como la reducción de

inventarios de bodega, de equipos auxiliares, aumento de la disponibilidad del personal de mantenimiento y mejora de la disponibilidad de presupuesto asignado al Departamento de Mantenimiento así como la rentabilidad del producto terminado.

El presente estudio se llevará a cabo realizando un análisis de los costos actuales asociados al mantenimiento y operación en el proceso de extrusión de plásticos. Se realizará el diseño y caracterización de las necesidades para realizar el cambio de motor y tecnología.

En las dos empresas guatemaltecas que se tomaron como muestra del estudio, se ha realizado el cambio de motor en el proceso de extrusión de plásticos, pero no se ha investigado, ni documentado como afectó el cambio a los costos de operación y mantenimiento. Para comprobar y constatar el beneficio de realizar el cambio se utiliza la tecnología actual para garantizar la mejora a los costos de mantenimiento y operación. El presente estudio representa una gran utilidad práctica para la industria.

4. OBJETIVOS

General

Implementar el diseño de actualización de tecnología para motores de corriente directa (CC) a motores de corriente alterna (CA) con variador de frecuencia, en una máquina de proceso para extrusión de plásticos y evaluar los resultados de la implementación para un equipo de extrusión con un motor de 50 HP, y verificar la reducción en los costos de mantenimiento por la mejora en la gestión, mejora de los indicadores clave principales y aumento la disponibilidad del personal del departamento de mantenimiento.

Específicos

1. Diseñar el cambio para los motores de corriente continua (CC) a motores de corriente alterna (CA) controlados por variador de frecuencia, caracterizar los requerimientos y realizar calendarización.
2. Realizar un control y base de datos de los gastos actuales de las máquinas de extrusión de plásticos asociados al mantenimiento y la operación de los motores de corriente continua (CC).
3. Realizar un control, estimaciones y proyecciones de los gastos asociados al mantenimiento y la operación de las máquinas de extrusión de plásticos utilizando la tecnología de motores de corriente alterna (CA) controlado por medio de variador de frecuencia.

4. Determinar los beneficios de realizar la actualización de tecnología, reduciendo tiempos de recursos del personal de mantenimiento.

5. ALCANCE

El presente estudio se limita a motores eléctricos de corriente continua (CC) de entre 50 y 250 HP de potencia. Esto realizando el análisis de diseño para todo el rango de motores y la implementación en un equipo con motor de 50 HP de corriente continua (CC). Tomando como base el proceso de extrusión de plásticos, aunque podría ser aplicable a procesos con similares características de velocidad, potencia y control.

La actualización de la tecnología pretende tener una mejora en los costos de mantenimiento y operación medible. Esto mediante un análisis económico incluyendo entre sus variables, la reducción del *stock* de repuestos necesarios para mantenimiento, eliminación de equipos auxiliares para la operación, reducción de consumo energético y de las reparaciones del motor instalado. Así como el costo de estas reparaciones y trabajos de mantenimiento programado.

Se realizarán bases de datos, controles y seguimientos de los costos actuales de la operación del *stock* de repuestos, horas de trabajo invertidas en los trabajos de mantenimiento, mediante listados y hojas de cálculo de costos. Esto para generar proyecciones de costos de operación y mantenimiento futuro, aplicando los cambios diseñados.

El presente estudio es tipo descriptivo. Se realizará la caracterización del cambio de motor para las maquinas extrusoras de plástico, se detallarán los costos actuales y los proyectados luego de realizar el cambio, detallando las ventajas que trae consigo el cambio.

Se realizará la implementación de la actualización de tecnología diseñada a un equipo de extrusión de plásticos, con un motor de 50 HP durante agosto. Esto para recolección de datos en septiembre, para realizar análisis y conclusiones durante octubre 2015.

5.1. Mantenimiento industrial

Se define como una serie de actividades para garantizar el óptimo funcionamiento de los activos de una industria, la disponibilidad de todos los equipos y en general asegurar la confiabilidad de la maquinaria. Esto para satisfacer las necesidades de los usuarios y clientes de las organizaciones industriales.

Hasta hace algunos años el mantenimiento se consideraba en las industrias como un mal necesario. Se tenía el concepto de ser un gasto necesario, sin agregar ningún valor extra al proceso productivo. Esta percepción ha cambiado mediante la introducción de la ingeniería de mantenimiento convirtiendo la visión a un mantenimiento proactivo.

En los últimos años se han implementado muchas estrategias de mantenimiento con el objetivo de mejorar la administración del departamento y de cambiar esta visión. Se definen las etapas de evolución de la gestión de mantenimiento en los siguientes pasos:

- Mantenimiento a la falla, correctivo de emergencia o inmediato
- Mantenimiento planificado o correctivo diferido
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento basado en condición
- Mantenimiento de actualización

Todas estas estrategias buscan mejorar el desempeño de los activos de las organizaciones. En general se busca tener confiabilidad y para llegar a este punto, que es conocido como mantenimiento de clase mundial, se toma en cuenta los factores intrínsecos a la administración de mantenimiento. Estos son: solución de problemas, realización de análisis, seguridad industrial, administración de personal, planeación, control de inventarios, diseño, ejecución de mantenimiento, entrenamiento y capacitación, operación y reemplazo.

5.2. Ingeniería de mantenimiento

El objetivo es describir las responsabilidades mantenimiento, clasificar el servicio de mantenimiento, planificación de mantenimiento, estrategias de control, programación y ejecución, medición de las actividades y resultados. Aunque antes de comprender todos estos temas de la gestión y administración del mantenimiento, se debe entender la importancia y los conceptos inherentes al mantenimiento.

5.3. Planeación de mantenimiento

Para lograr un mantenimiento de clase mundial es importante tener clara la división adoptada por las diferentes estrategias establecidas. Una de las divisiones aceptadas como ideal es:

- Mantenimiento preventivo 25 % o menos
- Mantenimiento correctivo 75 % máximo
- Fallas imprevistas menos del 10 %

5.4. Corriente eléctrica

Una buena planeación de mantenimiento tiene como objetivo evitar altos costos y disminución de la confiabilidad de los equipos. Con ello se garantiza la optimización de todos los recursos.

Es importante tomar en cuenta las actividades complementarias a las actividades de mantenimiento como: lubricación, ensayos no destructivos, mantenimiento predictivo, análisis VOSO, reacondicionamiento de piezas, actualización de tecnologías, seguridad y medio ambiente, gestión y evaluación e proyectos, así como la automatización de procesos. El presente trabajo de investigación tiene como punto fundamental la actualización de tecnologías, automatización de procesos y reacondicionamiento de piezas, aplicando sistemas de control para equipos eléctricos. Por lo que se realiza una introducción a los conceptos de la mecánica eléctrica.

Se define la corriente eléctrica como el flujo de cargas eléctricas a través de una región. Otra definición aceptada es que la corriente es la rapidez a la cual fluye la carga a través de una superficie. (Sear Zemansky, 1999)

La regla convencional es asignar a la corriente la misma dirección que la del flujo de carga positiva. Existen varios factores que afectan la corriente eléctrica tales como, el conductor, el ambiente, las cargas, entre otras.

“De acuerdo a la dirección de la corriente eléctrica esta se divide en dos, cuando la dirección es constante se obtiene corriente directa (CD) y cuando la dirección de la corriente es variable o cambia periódicamente se le llama corriente alterna (CA)”. (Sear Zemansky, 1999, p. 845)

Después que Hans Christian Oersted profesor de Física en la Universidad de Copenhague, Dinamarca, demostrara en 1820 que una corriente eléctrica afecta la aguja de una brújula, produciendo un movimiento al inducir una fuerza sobre ella, Faraday propuso la base de sus teorías, con base en su idea. Si una corriente eléctrica podía producir un campo magnético, de igual forma un campo magnético debería ser capaz de producir una corriente. (William H. Hayt & Buck., 2006)

La corriente continua se descubre con la invención de la primera batería por el científico Conde Alessandro Volta. Esta inicia con sus aplicaciones en la década de 1880 de la mano de Thomas Alva Edison, quien con pequeñas generadoras alimentaba pequeños poblados en el área de Nueva York hasta que a finales de la década inicia el desarrollo de la corriente alterna. Esta comienza por los estudios y desarrollo de Nikola Tesla.

La corriente alterna se usa hasta la actualidad y se dice que ganó el pulso ante la corriente continua debido a la eficiencia de transmisión a tensiones elevadas y largas distancias. Lo anterior utilizando menos cobre en los tendidos eléctricos haciéndola de esta manera la solución más económica.

5.5. Circuito de corriente directa

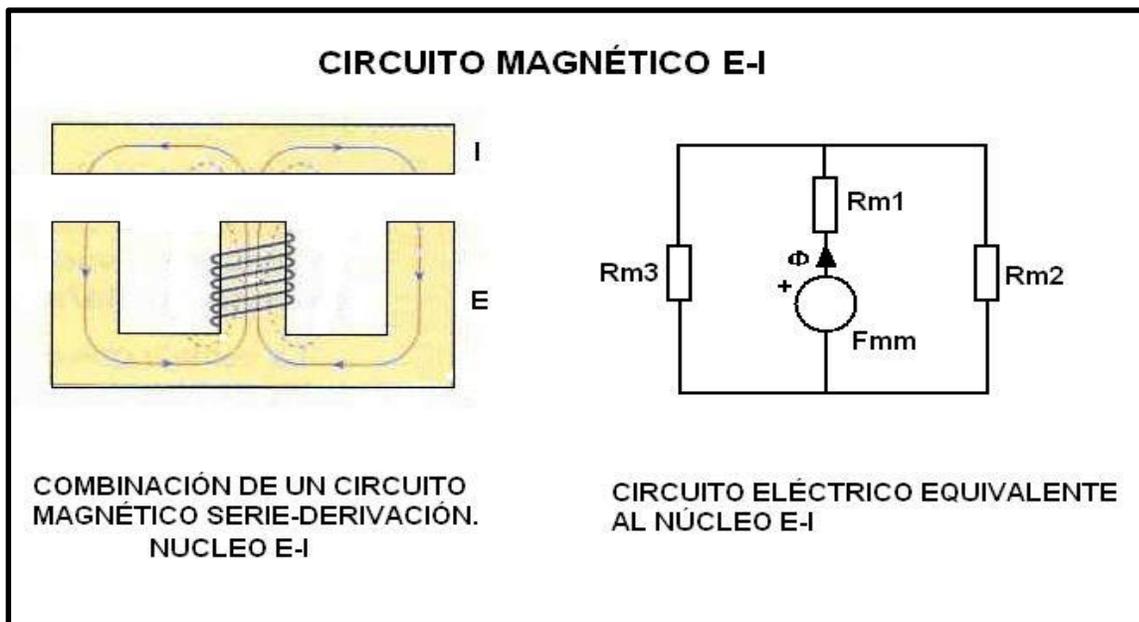
En los análisis de circuitos de corriente directa generalmente se utiliza una batería, ya que la diferencia de potencial entre las terminales es constante. Por lo que genera una corriente constante en magnitud y dirección, por lo que ya se reviso es una corriente directa. (Sear Zemansky, 1999)

Cuando se aplica una corriente directa a un material ferromagnético estos reaccionan con el campo y lo modifican. A dicho fenómeno se le denomina

magnetización y con esto se produce un flujo magnético en dicho material. Este es el principio de funcionamiento de la maquinaria eléctrica y los transductores. (Gourishankar, 1990)

Se tienen muchos ejemplos de aparatos electromagnéticos, como transformadores, motores, generadores, instrumentos de medición, entre otros. Estos tienen partes o son hechos con materiales ferromagnéticos, para el estudio de estos se tiene un problema tridimensional pero se reduce a un problema de una dimensión al reemplazar el aparato por un circuito. Este se compone de elementos mecánicos, eléctricos o magnéticos.

Figura 1. Núcleo de un transformador E-I y su circuito equivalente



Fuente: Plataforma e-ducativa aragonesa. *Circuitos Magnéticos*.

5.6. Circuito de corriente alterna

Para el estudio de los circuitos de corriente alterna se necesita una fuente de fem o voltaje alterno. Un ejemplo de estos es una bobina de alambre que gira con velocidad angular constante en un campo magnético. Al realizar este giro se crea una fem alterna sinusoidal y es el prototipo del generador comercial de corriente alterna o generador, (Sear Zemansky, 1999). El mismo principio de un motor pero en este se inyecta la corriente alterna creando el movimiento mecánico de giro.

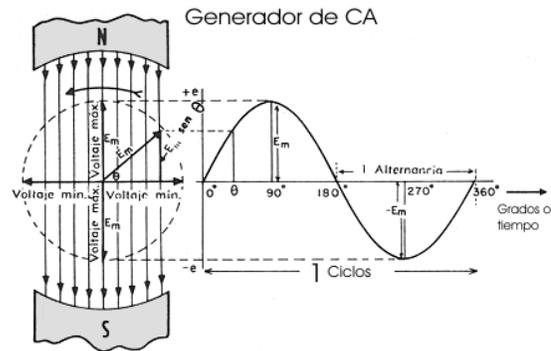
Al contrario de los circuitos de corriente directa en los que los campos magnéticos no varían con el tiempo, excepto cuando se conecta o desconecta. En los circuitos de corriente alterna los campos magnéticos varían con el tiempo cuando están relacionados con muchos aparatos magnéticos, tales como: transformadores, motores y generadores. (Gourishankar, 1990)

En los circuitos de corriente alterna se observa cómo por medio de la ley de Faraday una fem se induce en un medio cuando se cambia el enlazamiento del flujo magnético asociado al medio. Y con la ley de Lenz se determina el sentido o dirección de la fem. (Gourishankar, 1990)

En este tipo de aparatos se tiene una forma de onda de potencial eléctrico sinusoidal, descrita como:

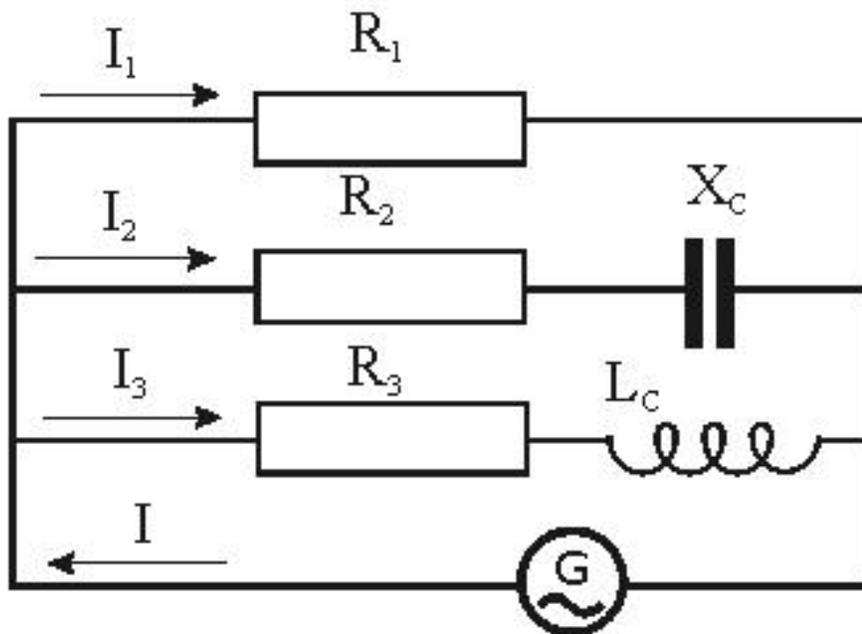
$$e(t) = E_{\max} \sin \omega t \quad (1)$$

Figura 2. **Generación de una onda sinusoidal de corriente alterna por medio de una armadura giratoria**



Fuente: Sapiens. *Conceptos de Electrotecnia*. www.sapiensman.com. Consulta: noviembre de 2015.

Figura 3. **Circuito de corriente alterna RLC**



Fuente: GUIJARRO-GIL, Luis. *Electrotecnia*. p. 16.

- PAR (τ): en el movimiento circular la fuerza que se aplica a un elemento u objeto para modificar la velocidad del mismo, cuanto más grande sea el par aplicado al objeto mucho más rápido cambiará su velocidad angular. (Chapman, 2005).

Al par se le puede llamar fuerza de torsión. Se define como el producto de la fuerza aplicada al objeto y la distancia más corta entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación del objeto.

$$\tau = rF\text{sen}(\theta) \quad (2)$$

Donde r es un vector que apunta desde el eje de rotación hasta el punto de aplicación de la fuerza, F es la fuerza aplicada y θ es el ángulo entre los dos; las unidades del par son newton-metro en las unidades del SI y libra-pie para el sistema inglés. (Chapman, 2005)

5.7. Potencia eléctrica

Se conecta un material conductor a una fuente de energía eléctrica tal como una batería o algún generador de energía eléctrica. Esto crea energía cinética para el movimiento de los electrones y el movimiento crea la corriente eléctrica en el conductor.

La potencia eléctrica P , que representa la rapidez a la cual se entrega energía a un elemento resistor, expresada en watt, se define como:

$$P = I^2R \quad (3)$$

La potencia en watts que absorbe una carga en cierto instante es el producto de la caída de voltaje instantáneo a través de la carga, en volts, y de la corriente instantánea que entra a la carga, en amperes. (Grainger & Jr, 1996)

Se define como la tasa a la cual se realiza trabajo, generalmente se mide en joules por segundo (watts), pero también se puede medir en pie-libra por segundo o en caballos de fuerza (hp).

Si el par es constante, en el movimiento rotatorio la potencia está dada por

$$P = T\omega \quad (4)$$

En los circuitos sinusoidales la definición de potencia se torna compleja, debido a que puede haber una diferencia de fase entre el voltaje y la corriente de CA suministrada a la carga. A esta diferencia de fase en los circuitos de CA aparecen tres tipos de potencia: Real, Reactiva y Aparente. (Chapman, 2005)

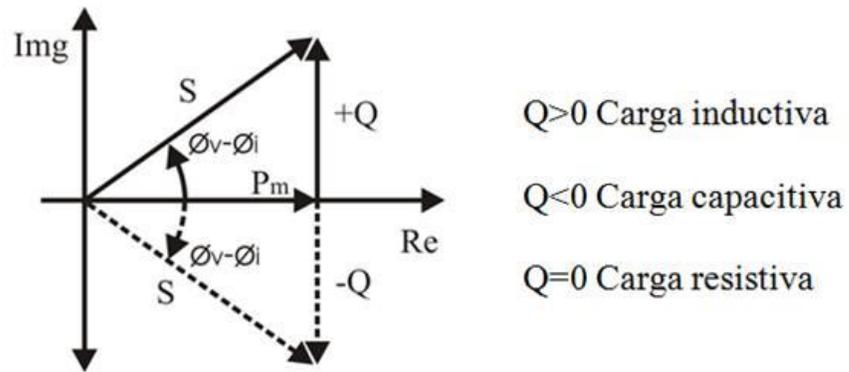
Por razones de sencillez, las potencias real y reactiva se representan juntas como potencia compleja S, donde

$$S = P + jQ \quad (5)$$

Estas potencias mencionadas se relacionan por medio del denominado triángulo de potencia. Este es un método gráfico para obtener P, Q y el ángulo de fase para cargas en paralelo si se conoce que $\cos \theta$ es $P/|S|$. (Grainger & Jr, 1996). El ángulo en la esquina inferior izquierda es el ángulo de impedancia θ . El lado adyacente a este triángulo es la potencia real P suministrada a la carga,

el lado opuesto del triángulo es la potencia reactiva Q suministrada a la carga y la hipotenusa del triángulo es la potencia aparente S de la carga.

Figura 4. **Triángulo de potencias**



Fuente: Universidad Miguel Hernández. *Análisis de circuitos y sistemas lineales*.

6. MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

Todas las máquinas eléctricas (incluidos, bajo una perspectiva general, los transformadores) están constituidas por uno o varios circuitos eléctricos acoplados magnéticamente. Para la construcción de los mismos se utilizan materiales ferromagnéticos para dos funciones ser el camino de baja reluctancia para el campo magnético y ser el soporte físico estructural al resto de componentes. (Feito, 2002)

Los dispositivos rotatorios de conversión de energía electromecánica son conocidos como máquinas rotatorias. Están clasificados por el tipo de corriente que generan o que los alimenta y pueden ser máquinas de corriente directa o máquinas de corriente alterna. (Gourishankar, 1990)

Entre las máquinas rotatorias se tienen a los generadores y los motores, de construcción idéntica ambos pueden ser o hacer ambas funciones, todo depende de la alimentación y la conversión de energía que realicen. Los generadores se alimentan de energía mecánica y generan energía eléctrica y los motores se alimentan de energía eléctrica produciendo energía mecánica. El uso de la máquina como motor o como generador depende básicamente del diseño práctico del equipo.

6.1. Motores eléctricos

Entre las máquinas eléctricas, el motor eléctrico es una máquina de conversión electromecánica (convierte energía eléctrica en energía mecánica de movimiento rotatorio). Esta energía es utilizada en muchas aplicaciones.

(Valdez Martínez, Jorge Salvador, Guevara López, Pedro, Sanchez García, Juan Carlos, 2011)

Transfiere potencia mediante diferentes tipos de acoplamientos, tales como cadenas, fajas, acoples lineales directos, magnéticos y otros.

Se constituye básicamente por un rotor constituido por chapas de material ferromagnético montado sobre un eje, es el encargado de transmitir el par al sistema mecánico exterior y un estator constituido por chapas magnéticas apiladas o material ferromagnético macizo alojado bajo una carcasa envolvente de protección. En los cuales se hacen combinar e interactuar campos electromagnéticos, que al atraerse o repelerse generan una fase de seguimiento haciendo de esta manera girar a diferentes velocidades el rotor, por medio de un espacio de aire denominado entrehierro.

Existen dos tipos de motores los de corriente alterna AC y los de corriente directa DC, utilizados ambos en amplios campos y por sus diferencias preferidos para diferentes aplicaciones.

6.2. Máquinas de corriente continua (CC)

Son generadores que convierten energía mecánica en energía eléctrica de CD y motores que convierten energía de DC en energía mecánica. (Chapman, 2005)

En general tienen el mismo principio básico de funcionamiento de las máquinas de corriente alterna AC, siendo un mecanismo llamado conmutador, que convierte los voltajes internos CA en voltajes CD en las terminales de

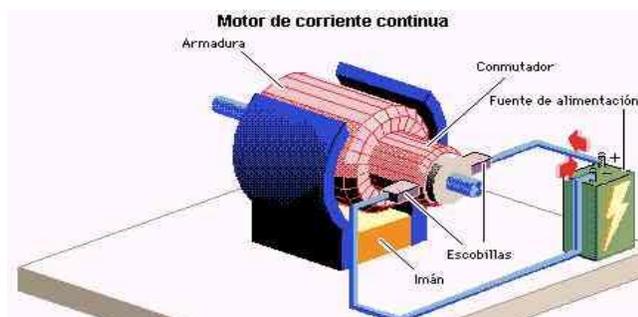
conexión externa. Esto le da otros nombres a la máquina de corriente continua como máquina de colector o de conmutación.

El par producido en la máquina de corriente continua es el producto del flujo y la corriente en la máquina, multiplicadas por una cantidad que representa la construcción mecánica de la máquina. En general el par de cualquier máquina real depende de los mismos tres factores:

- El flujo en la máquina
- La corriente en la máquina
- Una constante que representa la construcción de la máquina

El voltaje de CD se obtiene de la espira giratoria por los contactos que cambian de dirección, haciendo de esta manera que la salida del contacto siempre se acumule de la misma manera. Esto porque el voltaje que sale de la espira es alternativamente un valor positivo y un valor negativo ambos constantes. Estos segmentos giratorios semicirculares se llaman segmentos de conmutación y los contactos fijos se llaman escobillas. (Chapman, 2005)

Figura 5. **Motor de corriente continua**



Fuente: Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado, México. *Guía técnica de Operación y Mantenimiento de Sistemas y Motores Eléctricos.*

En las máquinas de CD reales hay varias maneras para conectar las espiras del rotor (también llamado inducido o armadura). Estas conexiones diferentes afectan el número de caminos de corriente paralelos que existen en el rotor, el voltaje de salida del rotor y el número y posición de las escobillas montadas sobre los segmentos del conmutador.

Como se mencionó anteriormente los primeros sistemas de potencia en Estados Unidos eran CD, pero a finales de la década de 1890 los sistemas de CA ganaban la batalla. A pesar de esto se siguieron utilizando motores de CD por muchas razones entre ellas las aplicaciones donde se requiere variación amplia de velocidad, aunque en los últimos 40 años el uso de estos ha disminuido considerablemente, debido a la creación de los rectificadores-inversores de potencia electrónicos. La regulación de velocidad (RV) de un motor se define como:

$$RV = \frac{\omega_{sc} - \omega_{pc}}{\omega_{pc}} \times 100\% \quad (6)$$

Esta explica una aproximadamente la característica de par-velocidad de un motor. La velocidad es inversamente proporcional a la carga aplicada al motor, en los motores CD se supone que el voltaje de entrada es constante, porque esto simplifica el análisis de los mismos y la comparación entre diferentes tipos de ellos. Hay cinco grandes tipos de motores de CD de uso general:

- Motor de CD de excitación separada
- Motor de CD en derivación
- Motor de CD de imán permanente
- Motor de CD en serie
- Motor de CD compuesto

(Chapman, 2005)

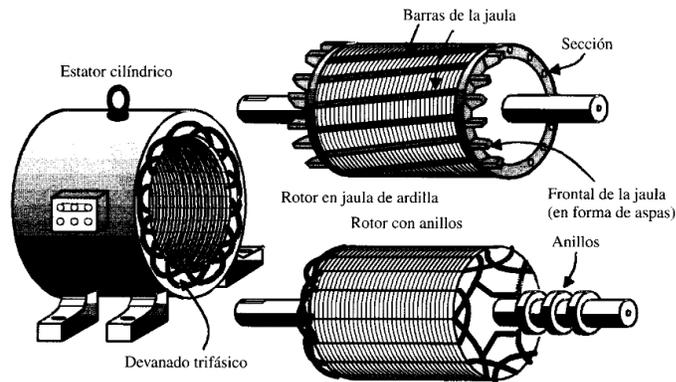
6.3. Máquinas de corriente alterna

Como todas las máquinas eléctricas, las máquinas asíncronas o de inducción constan de una parte fija, o estator, y una parte móvil, o rotor, separadas por un pequeño espacio de aire denominado entrehierro. (Feito, 2002) .

Los motores de inducción se alimentan de corriente alterna, suministrada directamente al estator, y a su vez induce corrientes en el rotor como se revisó en el apartado de circuitos eléctricos. Cuando se excita el devanado del estator con una corriente polifásica equilibrada se creará en el entrehierro un campo magnético rotativo que gira a la velocidad síncrona, determinada por el número de polos y la frecuencia aplicada.

Existen en las máquinas de corriente alterna dos tipos de rotores, bobinado y jaula de ardilla cuyo devanado está formado por varillas conductoras alojadas en ranuras practicadas en el hierro del propio rotor, y cortocircuitadas en ambos extremos mediante los dos platos conductores a los lados del rotor. La principal característica y ventaja de los motores de inducción es la sencillez y robustez de la construcción del rotor. (Fitzgerald, Charles Kingsley, & Kusko, 1980).

Figura 6. **Máquina asíncrona**



Tipos de máquinas asíncronas o de inducción.

Fuente: Electrotecnia aplicada a la ingeniería mecánica UD. 4. *Principios de electromagnetismo y funcionamiento y aplicaciones de las diferentes máquinas eléctricas.*

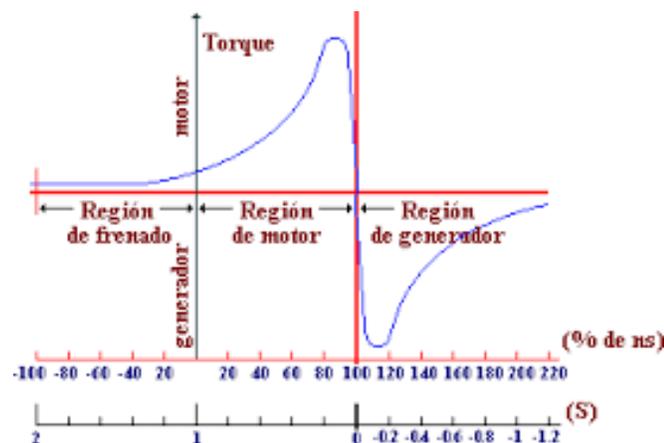
El rotor cuando se alimenta con corriente directa siempre se retrasa respecto al campo del estator. A esta diferencia de velocidades se le conoce como deslizamiento, la frecuencia de deslizamiento, es el movimiento relativo de los conductores del rotor con respecto al flujo que induce en ellos una tensión de frecuencia.

La máquina de inducción o de corriente alterna tiene tres zonas de trabajo representadas en la característica par-velocidad (o par-deslizamiento) para todos los valores posibles entre $-\infty$ y $+\infty$.

- $-\infty < \Omega < 0$: Zona de funcionamiento como freno, cuando se fuerza el rotor a girar en sentido opuesto al campo aplicando un par externo.

- $-0 < \Omega < \Omega$: Zona de funcionamiento como motor, corresponde al funcionamiento normal.
- $\Omega, < \Omega < +\infty$: Zona de funcionamiento como generador, la máquina gira en el mismo sentido que el campo giratorio, el deslizamiento es negativo y se aplica un par mecánico para acelerar la máquina arriba de la velocidad de sincronismo.

Figura 7. **Curva característica torque-velocidad del motor de inducción**



Fuente: FUENTES CONCHA, Patricio. *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Bio-Bio.*

6.4. Control de máquinas rotativas

Como se mencionó en los apartados anteriores una de las grandes ventajas de los motores DC es el control de la velocidad sin afectar el torque. Esta puede variar cambiando el voltaje, la resistencia de armadura, el flujo magnético o el torque, de estas posibilidades la más usual es variar la resistencia y el flujo magnético.

Otro de los métodos usados en el control de la velocidad de los motores DC es aplicar un voltaje fijo al campo en derivación y un voltaje variable de un generador de DC auxiliar a la armadura.

Para controlar y mantener la exactitud en la operación de los motores de DC se utilizan sistemas de control de retroalimentación. En estos sistemas se hacen arreglos para comparar un valor establecido y el valor real, para lo cual se puede utilizar un variador de frecuencia alimentado por la retroalimentación. (Gourishankar, 1990)

Una de las características más positivas del motor de inducción cuando se conecta directamente a su tensión asignada es su elevado par de arranque, que es típicamente de 1,4 a 1,6 veces el par de plena carga pero sufre mucho debido a que la corriente de arranque directo es muy elevada (de 5 a 5 veces la asignada). Por lo que utilizan diversos métodos de arranque para motores de inducción como:

- Arranque con autotransformador
- Arranque estrella-triángulo
- Arranque con arrancadores estáticos
- Arranque por inserción de impedancia

Uno de los principales problemas y por lo que en las aplicaciones que estudiamos es que la velocidad entregada por los motores asíncronos es constante o casi constante. Esto cambio con la irrupción en el mercado de los variadores de velocidad a frecuencia variable. Para variar la velocidad de un motor asíncrono se debe modificar alguna de tres variables que son, el número

de polos, el deslizamiento o la frecuencia de alimentación, solo las últimas dos permiten una variación continua de la velocidad. (Feito, 2002)

6.4.1. Variador de frecuencia

Por sus siglas en inglés VFD Variable Frequency Drive o bien Adjustable Frequency Drive. Este es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, con esta aplicación también se varía el voltaje al mismo tiempo que se modifica la frecuencia.

El variador es un dispositivo electrónico formado por dispositivos de conversión de estado sólido. Consta de un rectificador para convertir la energía AC de alimentación en DC y luego esta se convierte en sinodal de AC con un inversor conmutado.

Uno de los métodos actuales y que brinda oportunidades de eficiencia energética es la variación de velocidad por medio de variadores de frecuencia con motores asíncronos. Este será el principio que utilizaremos en la propuesta actualización de tecnología planteada en este estudio.

7. ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. PRINCIPIOS BÁSICOS

- 1.1. Mantenimiento industrial
- 1.2. Ingeniería de mantenimiento
- 1.3. Automatización de mantenimiento
- 1.4. Motores eléctricos DC
 - 1.4.1. Historia de los motores eléctricos
 - 1.4.2. Características de los motores DC
 - 1.4.3. Diferencias con los motores de AC
- 1.5. Evolución de la tecnología de los motores eléctricos
- 1.6. Uso de motores eléctricos DC en las máquinas de extrusión de plástico
- 1.7. Reacondicionamiento de piezas y actualización de equipos
- 1.8. Impacto de los equipos en la administración de mantenimiento
- 1.9. Indicadores claves del Departamento de Mantenimiento
- 1.10. Optimización del mantenimiento
 - 1.11. Justificación de costos de mantenimiento

- 1.12. Impactos de mantenimiento al medio ambiente
- 1.13. Normas aplicables a mantenimiento

- 2. ANÁLISIS TÉCNICO DE LA ACTUALIZACIÓN DE TECNOLOGÍA DE MOTORES DC A MOTORES AC CON VARIADOR DE FRECUENCIA
 - 2.1. Opciones de la actualización de tecnología
 - 2.1.2. Ventajas y desventajas de las tecnologías
 - 2.2. Recursos necesarios para realizar la actualización
 - 2.3. Conversión AC/DC
 - 2.4. Aplicaciones de la conversión AC/DC
 - 2.5. Variables de control para la conversión AC/DC

- 3. ANÁLISIS ELÉCTRICO DE LA ACTUALIZACIÓN DE TECNOLOGÍA Y VENTAJAS ECONÓMICAS
 - 3.1. Análisis eléctrico.
 - 3.2. Análisis económico

- 4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN DE MOTORES DC
 - 4.1. Operación de los motores DC
 - 4.1.1. Gráficas de operación
 - 4.1.2. Mantenimiento de los motores DC

- 5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN DE MOTORES AC
 - 5.1. Gráficas de operación
 - 5.2. Mantenimiento de los motores AC

- 6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

- 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

8. METODOLOGIA

El trabajo de investigación utilizará una metodología de estudio exploratoria y experimental de tipo mixto, debido a que en el país se ha tratado muy poco al respecto del tema y se realizará la prueba de actualización de la tecnología. Esto para verificar los resultados por lo que también será un estudio descriptivo, con análisis de las variables cuantitativas económicas en función de las variables cualitativas técnicas que se necesitan para realizar las operaciones de la maquinaria en cuestión.

Se recolectarán datos de operación y mantenimiento de diversos equipos en funcionamiento para verificar los costos de ambas acciones y verificar la mejora en los mismos al realizar la actualización.

- Fase 1: Es la fase de investigación y documentación. Es donde se reunirá toda la información necesaria para la realización del trabajo de investigación, se participará en cursos relacionados con el tema para apoyar el conocimiento y la información que se adquiera de libros, documentos, investigaciones, tesis y otros.

Con toda la información recopilada y con el completo conocimiento de las nuevas tecnologías se procederá a realizar el diseño para la actualización de los motores de corriente continua (CC) y sus sistemas de control, utilizando variadores de frecuencia y motores de corriente alterna (CA).

- Fase 2: es la fase de análisis de la situación actual uso de motores de corriente continua DC. En ella se evaluarán las condiciones actuales de operación de las máquinas extrusoras de plásticos funcionando con motores de corriente directa DC, los costos asociados al mantenimiento y operación de los mismos. Así como los problemas y dificultades de la operación y las ventajas de los mismos.
- Fase 3: es la fase de pruebas en base al diseño de actualización de tecnología. Se estudiarán las diversas formas de realizar la actualización de la tecnología, para utilizar motores de corriente alterna AC, los costos que se incurrirán en el cambio y la implementación, así como los propios del mantenimiento y operación de los mismos, los posibles problemas y dificultades de la operación y las ventajas de los mismos. Se realizará un cambio de motor de corriente directa y se utilizará la actualización de tecnología planteada utilizando un motor de corriente alterna controlado por un variador de frecuencia.
- Fase 4: es la fase de análisis económico. Se utilizarán los datos obtenidos de las dos fases anteriores, para justificar la actualización de la tecnología, y demostrar el tiempo del retorno de la inversión inicial, así como las ventajas que conlleva la actualización.
- Fase 5: es la fase final de informe y conclusiones, después de realizar el análisis eléctrico, técnico y económico, así como las pruebas respectivas, se procederá a realizar el informe final y dar las conclusiones obtenidas. Se deja constancia para la implementación de dicha tecnología, apoyando con esto el desarrollo de las industrias productoras de Guatemala, disminuyendo el consumo energético ayudando con ello a la preservación de los recursos naturales.

9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Se utilizarán técnicas de análisis cuantitativo y cualitativo, iniciando con una investigación bibliográfica, entrevistas con los usuarios de los equipos así como los administradores de ellos, consulta de registros. Estos son como, disponibilidad de los aparatos, costos asociados, productividad, planes de mantenimiento, y otros.

Y finalmente con base en la observación durante operación y manutención; para comparar características de utilizar ambas tecnologías, se evaluarán las variables de la tecnología con motores de corriente continua CC, los costos tanto de operación como de mantenimiento, la necesidad de inventarios de repuestos y accesorios. Así como el consumo energético actual y las variables que se tendrán con la actualización de tecnología a motores eléctricos de corriente alterna CA, el costo y el retorno de inversión al realizar el cambio, los gastos de mantenimiento y operación al realizar el cambio, la proyección de gastos de servicios y mantenimientos, el inventario de insumos y repuestos que se tendrá.

Se realizará el estudio de las características técnicas, eléctricas y mecánicas; por medio de comparación de capacidades, circuitos y necesidades de equipos y accesorios. Esto junto a los datos obtenidos en el estudio financiero que se realizará, servirá para concluir la ventaja de actualizar y el beneficio en función del tiempo de realizarla.

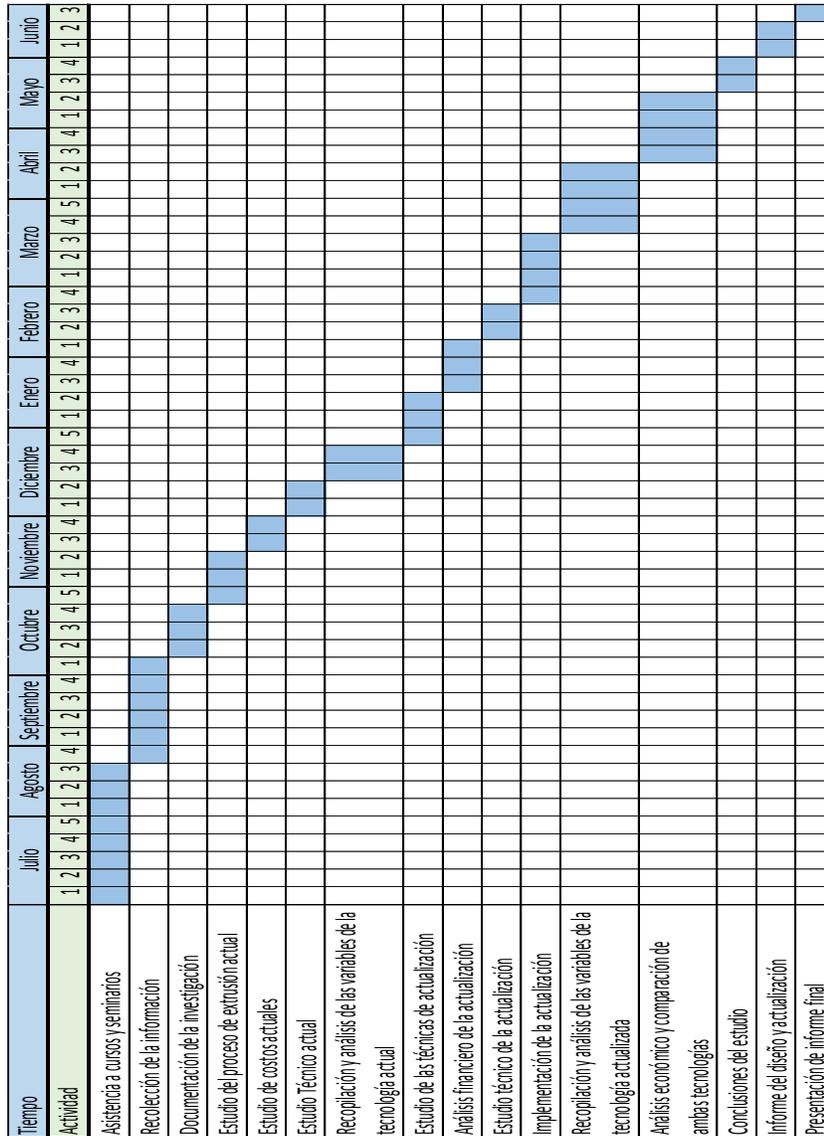
10. CRONOGRAMA

Se invertirá en la recolección de datos para crear la base del estudio, y cimentar la base del conocimiento necesario para realizar el diseño y la implementación de la actualización de tecnología, asistiendo a cursos y seminarios relacionados con el tema. Estos cursos y seminarios serán financiados por una de las empresas para las que se aplica el estudio, se necesita adquirir libros, revistas, manuales y artículos con el fin de recopilar información necesaria para el estudio. Estos serán financiados por el investigador.

Al finalizar el trabajo de investigación y recolección de información se debe invertir el tiempo necesario para realizar los análisis de costos de operación y mantenimiento de ambas tecnologías. Al tener los datos económicos y técnicos que sustenten la actualización se procederá a realizar la compra del equipo nuevo para la implementación del diseño para un equipo de extrusión de plásticos con un motor de 50 HP. Se detalla en la tabla de factibilidad los equipos y accesorios necesarios para realizar el cambio de tecnología; la inversión para realizar la actualización será por una de las empresas en donde se aplica el estudio.

Es necesario tomar en cuenta la contratación o las horas hombre requeridas para realizar el cambio de tecnología y al finalizar la inversión de tiempo. Esto para realizar la recolección de los datos, los análisis técnicos y financieros y el análisis de resultados, el personal y las horas para realizar la actualización de tecnología y el estudio será financiado por una de las empresas estudiadas.

Figura 8. Cronograma



Fuente: elaboración propia.

Tabla II. Recursos financieros

Detalle	Valor
Trabajo de investigación <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de investigación • Recursos necesarios para la investigación 	Q5 000,00
Cursos y seminarios <ul style="list-style-type: none"> • Seminario actualización de variadores Rockwell • Seminario Soluciones integrales para la industria • Curso variadores de velocidad por ethernet • Curso variadores de velocidad migración DC a AC • Otros cursos y seminarios. 	Q10 000,00
Compra de libros y documentos <ul style="list-style-type: none"> • Compra de libros • Compra de manuales 	Q5 000,00
Compra de revistas y artículos <ul style="list-style-type: none"> • Compra de revistas técnicas • Compra de artículos científicos 	Q5 000,00
Estudio y análisis actual de costos	Q10 000,00
Implementación de caso de análisis de actualización <ul style="list-style-type: none"> • Compra de motor • Variador de velocidad • Cableado y accesorios • Servicio de instalación • Planificación y ejecución de la actualización 	Q55 000,00
Análisis financiero, estudio y evaluación de la actualización	Q15 000,00
Valor total del estudio de implementación	Q105 000,00

Fuente: elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

1. CA, F. R.-B.-C. (2011). *Manual Técnico de Motores Eléctricos*. San José, C.R. : BUN - CA.
2. CARRION, Nin J. (2000). *Procesos de Fabricación de Productos Plásticos*. *Industrial Data*, 1-4.
3. CHAPMAN, S. J. (2005). *Máquinas Eléctricas*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
4. DÍAZ, J., & Pardo, A. (2004). *Estrategias avanzadas de control en accionamientos de corriente alterna*. *Revista Ciencia e Ingeniería* Vol. 25 No. 1., 23-27.
5. DUFFUAA, S. O., & Raouf, A. D. (2000). *Sistemas de Mantenimiento, Planeación y Control*. Mexico, D.F.: Limusa, S.A. de C.V.
6. DURÁN, J. B. (2003). *Nuevas Tendencias en el Mantenimiento En La Industria Eléctrica*. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 1, NO. 1, 21-26. Obtenido de mantenimiento Planificado.
7. Electromaquinas, T. y. (20 de 12 de 2013). *Diferencia Entre Motores CA y Motores CD*. México D.F., Del. Iztapalapa, México.
8. FEITO, J. S. (2002). *Máquinas Eléctricas*. Madrid: Prentice Hall.

9. FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY, J., & KUSKO, A. (1980). *Máquinas Eléctricas*. Barcelona, España: Hispano Europea.
10. GOURISHANKAR, V. (1990). *Conversión de Energía Electromecánica*. Mexico: Alfaomega, S.A. de C.V.
11. GRAINGER, J. J., & Jr, W. D. (1996). *Análisis de Sistemas de Potencia*. México: McGraw-Hill Interamericana.
12. GUTIÉRREZ URDANETA, E. E., & ROMERO BARRIOS, M. T. (2014). *Optimización Costo Riesgo para la determinación de Frecuencias de Mantenimiento o de Reemplazo*. *Predictiva* 21, 6-17.
13. LINARES-FLORES, J., Antonio-GARCÍA, A., & ORANTES-MOLINA, A. (2010). *Arranque Suave para un motor de CD a través de un convertidor reductor CD-CD*. *Ingeniería , Investigación y Tecnología*, 137-148.
14. PENROSE, H. W. (2010). *Evaluación eléctrica del motor de corriente continua mediante un análisis del circuito del motor*. All-Test Pro, LLC, 1-9.
15. PIEDRAFITA MORENO, R. (2004). *Ingeniería de la Automatización Industrial*. Madrid, España.: Ra-Ma.
16. SCOTT, B. (2005). *Reducing electrical energy costs for extrusion processes*. *Integrated Control Technologies*, 1-6.

17. SEAR ZEMANSKY, Y. F. (1999). *Física Universitaria* . Mexico: Pearson Educación.
18. VALDEZ MARTÍNEZ, Jorge Salvador, GUEVARA LÓPEZ, Pedro, SANCHEZ GARCÍA, Juan Carlos. (2011). *El Motor de Corriente Continua con Campo Serie y Sus Perdidas Eléctricas, Mecánicas y Magnéticas*. Aleph-Zero.
19. VERA-SORROCHE, J., Kelly, A. L., BROWN, E. C., GOUGH, T., Abeykoon, C., Coates, P. D., . . . Price, M. (2014). *The effect of melt viscosity on thermal efficiency for single screw extrusion of HDPE*. Chemical Engineering Research and Design, 1-9.
20. VILABOA B., J. (2004). *Gestión de la Automatización de Plantas Industriales en Chile*. Revista Facultad de Ingeniería, U.T.A. (Chile), 33-41.
21. VIVEROS, P., STEGMAIER, R., KRISTJANPOLLER, F., BARBERA, L., & CRESPO, A. (2013). *Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo*. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 125-138.
22. WEBER, A. (2005). *Key Performance Indicators*. Burlington Ontario: Ivara Corporation.
23. WILLIAM H. Hayt, J., & Buck., J. A. (2006). *Teoría electromagnética*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

