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

ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 KW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA

Gustavo Adolfo Castillo Rodas
Asesorado por Ing. Selvin Alenxander Gonzalez Velázquez

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 KW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GUSTAVO ADOLFO CASTILLO RODAS
ASESORADO POR ING. SELVIN ALEXANDER GONZALEZ VELÁSQUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ENERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordoba Estrada
VOCAL I	Ing. Jose Francisco Gomez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordoba Estrada
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carillo
EXAMINADOR	Ing. Kennet Issur Estrada Ruíz
EXAMINADOR	Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
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:

ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 KW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 11 de septiembre de 2019.

Gustavo Adolfo Castillo Rodas

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala, 17 de octubre de 2022.
REF.EPS.DOC.342.10.2022.

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.

Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Gustavo Adolfo Castillo Rodas** de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, Registro Académico No. **200313307 y CUI 2355 65253 2216,** procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 kW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA".**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Eléctrica

Universidad de San Carlos de Guatemala
Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
ASESOR - SUPERVISOR DE EPS
Unidad de Prácticas de Ingeniería y EPS
Facultad de Ingeniería

c.c. Archivo
NJRG/ra

Guatemala, 18 de Mayo de 2022.

Ing. Oscar Argueta Hernandez.
Director Unidad de EPS.
Facultad de Ingeniería.

Estimado Ingeniero Argueta:

Por este medio me permito dar aprobación al informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) titulado: **"ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 KW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA"** desarrollado por el estudiante Gustavo Adolfo Castillo Rodas, quien se identifica con el CUI 2355 65253 2216 y registro académico No. 2003-13307, previo a optar el título de Ingeniero Electricista.

En base a la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos, por lo que el estudiante y asesor, nos hacemos responsables del contenido del trabajo.

Sin otro particular, me despido cordialmente.

Atentamente,

f: _____

Ing. Selvin Alexander Gonzalez Velázquez.

Selvin Alexander González Velásquez
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 8546

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Unidad de EPS

Guatemala 17 de octubre de 2022.
REF.EPS.D.342.10.2022.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Rivera Carrillo.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 kW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Gustavo Adolfo Castillo Rodas**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Selvin Alexander González Velázquez y supervisado por el Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y el Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"

DIRECCIÓN

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS

/ra

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Guatemala, 9 de agosto de 2022

Ingeniero
Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Rivera:

Por este medio, con base a lo indicado en el REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADUACION vigente, tengo a bien proponer la aprobación del trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 KW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA.

del estudiante Castillo Rodas, Gustavo Adolfo, habiendo cumplido con los requisitos establecidos en el referido reglamento y conforme la aprobación de los asesores.

Sin otro particular

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ingeniero Fernando Alfredo Moscoso Lira
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

REF. EIME 75.2022.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, y aprobación del director de EPS al trabajo de Graduación del estudiante Gustavo Adolfo Castillo Rodas: "ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 kW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA", procede a la autorización del mismo.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 17 de noviembre de 2022.

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.119.2023

La Decana 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: **ESTUDIO PARA EL REEMPLAZO DE MOTOR DE 137 KW Y VARIADOR DE VELOCIDAD DE DC, POR UN MOTOR Y VARIADOR DE VELOCIDADES DE AC Y READECUACIÓN DE CIRCUITOS DE CONTROL PARA LÍNEA DE EXTRUSIÓN MONOCAPA,** presentado por: **Gustavo Adolfo Castillo Rodas,** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme paciencia y sabiduría.
Mis padres	Mi padre Ruperto Castillo (q. e. p. d.) y mi madre Irma Rodas por su apoyo incondicional.
Mis hermanas	Raquel, Rosaura, Jessica y Michel Castillo. Por las palabras de aliento en los momentos de desilusión.
Mi hermano	Rafael Castillo.Por brindarme su ayuda cuando lo necesite.
Mi esposa	Scarlett Caniz. Por la tasa de café en acada noche de desvelo y por la compañía en cada atapa de este proceso.
Mi hija	Adriana Castillo Caniz. Por sus palabras de aliento “vamos papi, pasito a pasito” y “siempre con buen ánimo”.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser el centro de enseñanza que me inculco la responsabilidad, el trabajo y la dedicación.
Mis amigos	Jose Peralta y Dalvin Bonilla, su apoyo y motivación a lo largo de ´los años de estudio fue algo importante y que pienso que no podré pagar.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES VII
LISTA DE SÍMBOLOS XI
GLOSARIO XIII
RESUMEN XV
OBJETIVOS XVII
INTRODUCCIÓN XIX

1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 1
   1.1. Planteamiento del problema 1
   1.2. Formulación y delimitación del problema 3
      1.2.1. Pregunta general 4
      1.2.2. Preguntas especificas 4
   1.3. Justificación e importancia de la investigación 4
   1.4. Alcance de la investigación 6

2. FASE DE INVESTIGACIÓN 9
   2.1. Antecedentes de la investigación 9
      2.1.1. Estudios internacionales 9
      2.1.2. Estudios nacionales 11
   2.2. Evolución de la tecnología de lo motores eléctricos 13
   2.3. Fundamentos teóricos 17
      2.3.1. Corriente eléctrica 17
      2.3.2. Circuito de corriente eléctrica 19
      2.3.3. Circuito de corriente alterna 20
      2.3.4. Potencia eléctrica 23

2.3.5. Máquinas eléctricas rotativas 25
2.3.5.1. Motores eléctricos 25
2.3.5.2. Máquinas de corriente continua (CC/DC) 26
2.3.5.3. Máquinas de corriente alterna 29
2.3.5.4. Control de máquinas rotativas 32
2.3.5.5. Variador de frecuencia 34
2.4. Principios básicos 34
2.4.1. Industria de empaque flexible 35
2.5. Máquinas para extrusión (de película soplada) 39
2.6. Tipos de máquinas para extrusión 42
2.6.1. Extrusoras monocapa y multicapa 42
2.6.2. Extrusión mono-husillo 43
2.6.2.1. Unidad embobinadora o enrolladora 49
2.6.2.2. IBC (Internal Bubble Cooling) 50
2.6.2.3. Cabezal de extrusión 51
2.6.2.4. Cambiador de filtros 53
2.6.2.5. Cilindro de extrusión 54
2.6.2.6. Boca de alimentación 55
2.6.2.7. Motor 55
2.6.2.8. Reductor 56
2.6.2.9. Anillo de enfriamiento 56
2.6.2.10. Dosificador gravimétrico 57
2.6.2.11. Persiana 58
2.6.2.12. Torre de tiro 58
2.6.2.13. Guiadora de *film* 58
2.6.2.14. Tratador por efecto corona 58
2.7. Motores eléctricos empleados en extrusión 59
2.7.1. Características de los motores DC 60

2.7.2. Constitución básica de una máquina DC 61
2.7.2.1. Esquema básico de funcionamiento 62
2.7.2.2. Principio de funcionamiento de un motor de corriente continua 64
2.7.2.3. Inductor e inducido de un motor DC 65
2.7.3. Motores DC 66
2.7.4. Diferencias con los motores AC 70
2.7.5. Motores de corriente alterna CA 71
2.7.5.1. Estructura del motor CA 72
2.7.5.2. Velocidad en el campo giratorio 73
2.7.5.3. Par y deslizamiento 73
2.7.6. Clases de diseño de los motores de inducción 76
2.7.6.1. Diseño clase A 77
2.7.6.2. Diseño clase B 78
2.7.6.3. Diseño clase C 78
2.7.6.4. Diseño clase D 79

3. MARCO METODOLÓGICO 81
3.1. Diseño y tipo de investigación 81
3.2. Diseño de la investigación 83
3.3. Unidad de análisis 84
3.4. Fuente de la información 84
3.5. Metodología 85
3.6. Variables de la investigación 86
3.7. Operacionalización de las variables 87

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN 91
4.1. Actualización de tecnología para la propulsión del extrusor 91
4.1.1. Diferencias entre los motores AC y DC 93

4.1.2. Reacondicionamiento, piezas y actualización de equipos 94
4.1.2.1. Sistema que debe de ser sustituido 94
4.1.2.2. Variador de velocidad 96
4.1.3. Selección de nueva tecnología 98
4.1.3.1. Motor de AC250HP 98
4.1.3.2. Directrices para la selección de motor 98
4.1.3.3. Mantenimiento motor Siemens 1LE0141 106
4.2. Cálculo de Protecciones para Motor AC250HP 109
4.2.1. Corto circuito 111
4.2.1.1. Cálculo de corriente de corto circuito para sistemas de bajo voltaje 111
4.2.2. Características del motor 121
4.2.2.1. Tiempos de arranque en frío y en caliente (del fabricante) 123
4.2.3. Coordinación de sobre carga 124
4.2.3.1. Configuración de sobrecarga 124
4.2.3.2. Tipo de sobrecarga 125
4.2.3.3. Trazar la curva de coordinación de sobrecarga 125
4.2.4. Protección contra corto circuito 126
4.2.4.1. Tipo de dispositivo de protección contra corto circuito 127
4.2.4.2. Clasificación de interrupción del dispositivo de cortocircuito 127
4.2.4.3. Gráfico de coordinación de dispositivos de corto circuito 128

4.2.5. Detección de falla a tierra 129
4.2.6. Protección de conductores de circuito derivado ... 129
4.2.6.1. Cálculo de la ampacidad mínima del conductor 130
4.2.6.2. Gráfico de coordinación de conductores de circuito derivado 132
4.3. Variadores de frecuencia 136
4.3.1. Diagrama de bloques de un ASD 137
4.3.1.1. Ventajas y desventajas de los ASD ... 138
4.3.1.2. Funciones de los ASD 139
4.3.1.3. Criterios para la elección del ASD 139
4.3.1.4. Variador de Frecuencia. (ASD)..... 141
4.4. Diagramas eléctricos 144
4.4.1. Diagramas unifilares 145
4.4.2. Diagramas de potencia y control 148
4.5. Programación de variador de velocidad (ASD)..... 149
4.5.1. Parametrización de ASD 154
4.6. Gráficas de operación de motor 158
4.6.1. Gráfica de arranque y operación de motor de 185kW 160
4.7. Mantenimiento de ariador Mitsubishi Serie FR-800 164
4.7.1.1.1. Inspección diaria..... 165
4.7.1.1.2. Inspección periódica... 165
4.7.2. Inspecciones diarias y anuales 166
4.8. Línea de extrusión monocapa 177
4.9. Disminución de costo de adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica 179
4.9.1. Calcular ahorro energético a lograr con el reemplazo 180

4.9.2. Cálculo de costo de energía eléctrica de motor y variador DC 184
4.9.3. Cálculo de costo de energía eléctrica motor y variador AC 185
4.9.4. Relación entre las dos tecnologías 189
4.9.5. Cálculo del período de recuperación de la inversión 191

CONCLUSIONES 195
RECOMENDACIONES 197
REFERENCIAS 199
APÉNDICES 207

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Circuito magnético E-I 20
2. Generación de una onda sinusoidal de corriente alterna por medio de una armadura giratoria 21
3. Circuito de corriente alterna RLC 22
4. Triángulo de potencias 24
5. Motor de corriente continua 28
6. Máquina asíncrona 30
7. Curva característica torque-velocidad del motor de inducción 32
8. Línea de extrusión 41
9. Línea de extrusión 43
10. Extrusora mono-husillo 44
11. Extrusor mono-husillo 46
12. Diseño extrusor mono-husillo 48
13. Bobinador de contacto 50
14. IBC (Internal Bubble Cooling) 51
15. Cabezal de extrusión 52
16. Cambiador de filtros 53
17. Husillo 55
18. Anillo de enfriamiento 56
19. Dosificador gravimpetrico 57
20. Tratamiento por efecto corona 59
21. Constucción básica de máquina DC 62
22. Constitución de una maquina DC 63

23. Funcionamiento motor DC 65
24. Inductor e inducido motor DC 66
25. Partes de un motor AC 71
26. Curva de régimen motor asíncrono 74
27. Clases de diseño motores de inducción 77
28. Diferencia de motores AC y DC 94
29. Motor DC ABB de 180 kW, dañado 95
30. Placa de datos de motor DC ABB de 180 kW 95
31. ASD para motor DC 97
32. Placa de datos del ASD dañado 97
33. Caja reductora extrusora bandera 99
34. Esquema cinemático, extrusor monocapa 101
35. Valores eléctricos motores serie 1LE0141 SIEMENS 104
36. Motor Siemens Serie 1LE0141 105
37. Cinco áreas principales de estudios de coordinación para motores de LV (bajo voltaje) 110
38. Sistema de bajo voltaje 113
39. Diagramas de resistencia y reactancia para F1 y F2 117
40. Diagramas de reactancias para F1 118
41. Diagramas de resistencias para F1 118
42. Diagramas reducidos de R y X 119
43. Diagrama de reactacias F2 120
44. Curva de disparo de bimetálico Clase 10 126
45. Curva de disparo termomagnético DPX³ 128
46. Simplifying Motor Coordination 133
47. Grafica de Coordinación para motor de 250 HP 135
48. ASD típico utilizado en bajo voltaje 136
49. Diagrama de bloques de un ASD 137
50. Variador Mitsubishi serie F800 144

51. Diagrama unifilar motor AC 250 HP 146
52. Diagrama de potencia motor 147
53. Diagrama de potencia y control motor DC..... 148
54. Grafcet proceso de extrusión 151
55. Diagrama control y potencia..... 152
56. Comportamiento de la corriente en el motor a diferentes métodos de arranque 159
57. Arranque y operación de motor durante los primeros 20 segundos de funcionamiento. 160
58. Potencia eléctrica sin ASD 162
59. Potencia eléctrica con ASD 163
60. Mantenimiento de ariador Mitsubishi..... 164
61. Motor de 250 HP Siemens instalado 171
62. Motor de 250 HP Siemens instalado 171
63. Motor de 250 HP Siemens instalado 172
64. Gabinete eléctrico nuevo..... 172
65. Gabinete eléctrico de nuevos dispositivos..... 173
66. Gabinete eléctrico con interruptor de caja moldeada 174
67. Motor instalado y trabajando 175
68. Extrusora trabajando sin problemas..... 176
69. Medidor de energía 180
70. Característica kWh consumidos en 2018 181
71. Característica de horas de trabajo por mes..... 182
72. Precio por kWh por mes durante el 2018 183
73. Relación de consumo de energía eléctrica de motor y variador: DC v.s AC 190
74. Figura 74. Relación de costo de energía eléctrica de motor y variador: DC v.s AC 191

TABLAS

I. Operacionalización de las variables....88
II. Datos del motor dañado....96
III. Variables para selección de motor....105
IV. Mantenimiento de motor....107
V. Maxima corriente de rotor bloqueado....122
VI. Tiempos de parada caiente y frío....123
VII. Ajuste o clasificación de sobrecarga para motores de más de 1 caballo de fuerza....124
VIII. Extracto de tabla NEC 310-16....131
IX. Tiempo y corriente....134
X. Principales cargas para motores....140
XI. Modelo de ASD Mitsubishi....144
XII. Parámetros de ajuste del ASD....154
XIII. Mantenimiento de ASD....166
XIV. Costo de energía eléctrica anual (2018)....185
XV. Costo de energía eléctrica motor y variador....188
XVI. Inversión inicial....192
XVII. Período de recuperación de la inversión....192

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
fi	Frecuencia de red
hp	Caballo de fuerza
Ie	Corriente del devanado inductor o de excitación.
Ii	Corriente del devanado inducido.
kW	Kilo Watt´s
kWh	Kilo Watts's hora
Ø	Factor de potencia
p	Número de polor de motor
Q	Quetzal
R	Resistencia
Re	Resistencia total del circuito inductor
T	torque
Ve	Tensión de alimentación del circuito inductor
Vi	Tensión de alimentación del circuito inducido
X	Reactancia
Ω	Movimiento rotario

GLOSARIO

AFC	Adjustable Frecuency Controller
AFD	Adjustable Frecuency Driver
ASD	Adjustable Speed Driver
BMW	Bayerische Motoren Werke (Fábricas de Motores de Baviera)
CA /AC	Corriente alterna
CC/DC	Corriente continua
F.C.E.M	Fuerza Contraelectromotriz
FIABILIDAD	Calidad de fiable
HP	Potencia del motor
IBC	Internal Bubble Cooling (Enfriamiento forzado de la burbuja)
IEC	International Electrotechnical Comision
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

L.N.	Línea natural
NEMA	National Electric Manufacturers Association
RPM	Revoluciones por minuto

RESUMEN

La presente investigación se orienta a estudiar una situación fáctica como es Estudiar el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa, aplicable a la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico.

Objetivo general: habilitación de línea de extrusión monocapa. Objetivos específicos: actualización de tecnología para la propulsión del extrusor; aumentar la disponibilidad de la línea de extrusión monocapa, por medio de componentes actuales que faciliten tareas de mantenimiento y reparación; disminuir el costo de: adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica.

Metodológicamente, el tipo de esta investigación de campo, explicativa sustentada en un estudio documental de carácter descriptivo. Fases de investigación: inicio, reconocimiento de actividades para determinar cuáles son los principales circuitos de potencia y control los cuales se debían de modificar e integrar a las nuevas tecnologías. Buscar información de la máquina, manuales y diagramas del fabricante. Planificación, verificación y levantado de planos eléctricos en máquina para determinar (seguridad) la circuitería que requiere modificar para la integración de los nuevos componentes. Se realizaron cálculos para determinar potencia y características del nuevo motor y variador de velocidad, tomando en cuenta en este paso todas las protecciones, cables y dispositivos secundarios que sirvieron para el control del motor y variador de velocidad. Se realizaron cálculos y fabricación del armario de control donde están todos los componentes eléctricos. Ejecución, luego aprobado el proyecto, se

implanta el reemplazo de motor y variador de velocidad de AC. Cierre, se procedió a realizar pruebas y evaluar el funcionamiento y manejo de la maquinaria. Los instrumentos, fichas bibliográficas, cálculos y estadísticos. Se concluye: a los inversionistas se les recomienda la actualización técnico-mecánica-eléctrica de sus equipos, orientados a la gran eficiencia energética de estos equipos con motores AC y los Variadores de Frecuencia (VDF) ya que ofrecen un control completo sobre la velocidad y el consumo de energía del motor AC.

OBJETIVOS

General

Estudiar el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa, aplicable a la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico.

Específicos

1. Actualización de tecnología para la propulsión del extrusor. (Cambio de motor y variador de DC por un motor y variador AC.

2. Aumentar la disponibilidad un 5% la disponibilidad de la línea de extrusión monocapa, por medio de componentes actuales que faciliten tareas de mantenimiento y reparación.

3. Disminuir el costo de: adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica.

4. El consumo de energía eléctrica será monitoreado por un medidor de energía que se instalará en la máquina de extrusión monocapa.

.

INTRODUCCIÓN

Los motores de corriente continua (CC) cuenta con partes especializadas, por lo tanto, requieren el uso de diversos equipos auxiliares, como lo son ventiladores para enfriamiento tanto de los motores, así como de los elementos de control. Esto para complementar su óptimo funcionamiento, generando altos costos de operación al estar ligados a un consumo independiente de energía eléctrica; los cuales son un problema que, mediante actualización de tecnologías se pueden disminuir notablemente, Esto también incluye los sistemas de control que se puedan implementar. Como por ejemplo los variadores de frecuencia con control de velocidad y torque.

Desde principios del año 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. *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 Ramón, 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.

> Los Plásticos son los materiales de mayor auge desde 1995. 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. (J. Vera-Sor C. Abeykoon A. L. Kelly E. C. Brown, 2014)

En la maquinaria de procesamiento de polímeros, como las extrusoras de tornillo simple, la materia prima de polímero se alimenta a la máquina a través de una tolva, se transporta a lo largo del tornillo y se funde mediante una combinación de calor externo aplicado y generación de calor interno por cizallamiento. La presión generada fuerza al material fundido a través de una matriz conformada para formar el producto final. La calidad del producto extruido depende en gran medida de la consistencia de la masa fundida producida por el tornillo. (Beltrán Rico M. & Marcilla Gomis A., 2012)

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.

Por esta razón se estudiaron las ventajas que ofrecen las nuevas tecnologías en lo que respecta a motores de corriente alterna (CA) y los dispositivos electrónicos para el control de la velocidad. Con esto se pudo realizar la propuesta para la sustitución de motor de corriente directa (CC) y también los dispositivos de control para esta aplicación. INGRUP, Central de Empaques, S.A. es una empresa que se dedica a la fabricación de empaques para alimentos desde 1974, por lo cual durante este tiempo ha realizado importantes inversiones en equipos para producir empaques para alimentos de calidad.

Actualmente para el mercado de empaques flexibles para alimentos tiene destinadas 5 líneas de extrusión, 2 monocapa, 2 tricapa y una de 9 capas destinada para empaques especializados. Pero debido a la falla en una línea de extrusión monocapa las toneladas de material extruido para impresión se han reducido, disminuyendo con esto la capacidad de producción. Por tal razón se plantea la habilitación de la línea de extrusión fallada, con nuevos dispositivos, es decir realizar una actualización a la parte motriz del extrusor, lo que permitirá aumentar la cantidad de toneladas de material extruido destinado para impresión y otros empaques como termoencogibles.

La máquina de Extrusión Monocapa cuenta con un motor de corriente directa y su respectivo variador de velocidad el cual ha fallado por uso y vejez, para la habilitación de la línea de extrusión monocapa es necesario el reemplazo del motor y control de velocidad por uno más moderno que proporcione fiabilidad y menos costo de mantenimiento. Por tal razón se planificará el reemplazo de motor y variador de velocidad de corriente alterna para la propulsión del tornillo extrusor de la Extrusora Monocapa. Con esto se espera tener reducciones de consumo por el rubro de energía eléctrica y mantenimiento, además que proporcionara más fiabilidad a esta línea de producción.

De acuerdo con este análisis se procede a realizar el *Estudio para el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa* aplicado a la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. dedicada a la producción de envases de plástico.

En el capítulo I de la investigación, se plantean el problema y los objetivos que persigue este estudio, su justificación e importancia considerando su alcance

y las limitaciones. Así, la presente investigación tiene definidos objetivos específicos orientados a actualización de tecnología para la propulsión del extrusor; aumentar la disponibilidad de la línea de extrusión monocapa, por medio de componentes actuales que faciliten tareas de mantenimiento y reparación; y disminuir el costo de: adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica.

En el capítulo II, Fase de Investigación, contiene los antecedentes de la investigación, en esta parte se realizó una recopilación de estudios a nivel de postgrado, doctorales y de reconocidas revistas y publicaciones en Web que sirvieron de base, para el objetivo de estudio, en la aplicación metodológica y en las bases teóricas que orientan y soportan la investigación donde se describen conceptos actualmente utilizados por expertos, analistas económicos y comentaristas empíricos que evalúan estudios similares, entre otros; por medio de una revisión bibliográfica, que sustentan el desarrollo del proyecto.

En el capítulo III, Marco Metodológico, es donde se define el tipo de investigación utilizada, *tipificándolo explicativo*, con diseño documental de carácter descriptivo. Así mismo, se identifica la unidad de análisis, las técnicas y herramientas de recolección y análisis de la información. Adicionalmente, se detalla las fases de la investigación, la operacionalización de las variables.

En el capítulo IV, se presenta los resultados de la investigación en función al cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación, dando respuesta al problema planteado.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación y las referencias bibliográficas de los documentos que fueron consultados para el desarrollo del presente.

La rentabilidad de esta propuesta se abordará en la parte final de este estudio por medio del periodo de recuperación de la inversión (PRI), para este análisis se utilizarán las mediciones de energía eléctrica que serán registradas mediante un medidor de energía y también los datos teóricos de cálculo de energía por la instalación de la nueva tecnología esto en comparación con los datos obtenidos de la antigua instalación. En este análisis también se incluirá el costo de kW/h durante el periodo de un año.

1. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Los materiales poliméricos han aumentado considerablemente en las últimas décadas debido a su uso en diversos sectores industriales. Los plásticos tienen una gran demanda en las industrias de embalaje, construcción, automotriz, eléctrica y electrónica, además de muchas otras aplicaciones diversas (PlasticsEurope, 2012)

> Los Plásticos son los materiales de mayor auge desde 1995. 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. (J. Vera-Sor C. Abeykoon A. L. Kelly E. C. Brown, 2014, p. 723- 737)

En la maquinaria de procesamiento de polímeros, como las extrusoras de tornillo simple, la materia prima de polímero se alimenta a la máquina a través de una tolva, se transporta a lo largo del tornillo y se funde mediante una combinación de calor externo aplicado y generación de calor interno por cizallamiento. La presión generada fuerza al material fundido a través de una matriz conformada para formar el producto final. La calidad del producto extruido depende en gran medida de la consistencia de la masa fundida producida por el tornillo. (Beltrán Rico M. & Marcilla Gomis A., 2012)

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.

Por esta razón se estudiaron las ventajas que ofrecen las nuevas tecnologías en lo que respecta a motores de corriente alterna (CA) y los dispositivos electrónicos para el control de la velocidad. Con esto se pudo realizar la propuesta para la sustitución de motor de corriente directa (CC) y también los dispositivos de control para esta aplicación.

Central de Empaques, S.A. es una empresa que se dedica a la fabricación de empaques para alimentos desde 1974, por lo cual durante este tiempo ha realizado importantes inversiones en equipos para producir empaques para alimentos de calidad.

Actualmente para el mercado de empaques flexibles para alimentos tiene destinadas 5 líneas de extrusión, 2 monocapa, 2 tricapa y una de 9 capas destinada para empaques especializados. Pero debido a la falla en una línea de extrusión monocapa las toneladas de material extruido para impresión se han reducido, disminuyendo con esto la capacidad de producción. Por tal razón se plantea la habilitación de la línea de extrusión fallada, con nuevos dispositivos, es decir realizar una actualización a la parte motriz del extrusor, lo que permitirá aumentar la cantidad de toneladas de material extruido destinado para impresión y otros empaques como termoencogibles.

1.2. Formulación y delimitación del problema

Este EPS tuvo una duración de 6 meses. Durante el desarrollo del ejercicio profesional supervisado se realizó la planificación para la sustitución de motor y variador de velocidad de corriente directa por un motor y variador de velocidad de similar potencia en corriente alterna. Para todo esto se realizó un análisis exhaustivo de todas las señales de proceso, circuitos, diagramas y demás componentes que intervienen en el sistema de control para el buen funcionamiento y trabajo armonizado del extrusor. Por tal razón el propósito de este trabajo fue la planificación, ejecución y puesta en marcha de motor y variador de velocidad, para habilitar una línea de extrusión, y para esto fue necesario conocer todas las variables que intervienen en el control de los antiguos componentes para integrarlos en los nuevos dispositivos. Para llevar a cabo este trabajo fueron requeridos una serie de recursos, tales como: horas hombre de, investigación, planificación, cálculo de materiales y protecciones eléctricas.

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. 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.

1.2.1. Pregunta general

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

1.2.2. Preguntas especificas

- ¿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?

1.3. Justificación e importancia de la investigación

Realizar la investigación se justifica metodológicamente ya que cumple con las condiciones de todo estudio factible de realizar, ya que es:

- Importancia. En esta investigación se maneja un tema relevante para las empresas que desean abaratar costos y mejorar la calidad de sus productos para lo cual una alternativa es el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

- Delimitado**.** Se realizó una evaluación delimitada al motor de 180 kW que dispone la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A., el cual es específico para el estudio propuesto.

- Claro**.** Con este proyecto se pretende describir claramente el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa aplicable a una empresa productora de envases de plástico, sus fortalezas o debilidades según el estudio de investigación realizado en la materia.

- Factible**.** Se aplican condiciones reales sobre el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

- Implicaciones prácticas. En el estudio del reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa, se ejecuta la propuesta en la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico, mediante la actualización de tecnología para la propulsión del extrusor; aumentar la

disponibilidad de la línea de extrusión monocapa, por medio de componentes actuales que facilitaron las tareas de mantenimiento y reparación; y finalmente lograr disminuir el costo de adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica.

- Valor Teórico**.** El estudio presenta una propuesta aplicada que alimenta las bases teóricas del proceso de habilitación de línea de extrusión monocapa.

Bajo esta premisa, esta investigación se justifica académicamente porque el investigador puede mostrar los conocimientos adquiridos durante la carrera. Aunado a ello, este Trabajo de Grado puede despertar interés y ser utilizada como antecedente para futuras investigaciones a estudiantes de distintas carreras del área de ingeniería eléctrica, de cuyo desarrollo puede abordar aspectos teóricos, además de convertirse en fuente de posibles ideas para la selección de temas relacionados a ser investigados. Adicionalmente, pudiera ser objeto de profundizar análisis por parte de centros Universitarios, ya que los resultados obtenidos aportan datos que contribuyen con el desarrollo sostenido de los países.

1.4. Alcance de la investigación

Con la habilitación de la línea de extrusión a lo largo del ejercicio profesional supervisado, se tendrá la maquinaria para operar de forma ininterrumpida los 7 días de la semana, todo un mes y a lo largo de todo un año. A esto claro se deberá de descontar los días y horas que se programen para el mantenimiento preventivo regular y fallas que se puedan existir a lo largo de la operación. Pero es claro que lo que se pretende, es siempre tener la mayor disponibilidad para producir. Además, se tendrá una descripción detallada de las

principales características de los equipos requeridos que son de importancia para el departamento de producción y mantenimiento, así también se contará con los planos eléctricos de ubicación del equipo en el área que es involucrada en el proyecto dentro de la planta (maquinaria habilitada).

El alcance de la investigación fue teórico-práctico, ya que se fundamentó en los conocimientos adquiridos en la Universidad sobre Ingeniería Eléctrica, fundamentado en el tema del reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa y fue aplicado a la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico.

En cuanto al alcance geográfico, el estudio se desarrolló en la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico ubicado en la Ciudad de Guatemala, y se estudió el caso específico de un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

Con respecto al alcance metodológico, se realizó una investigación de campo, explicativa sustentada en un estudio documental de carácter descriptivo, donde se realiza un análisis de escenarios realmente aplicado a nivel práctico.

2. FASE DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio tiene como propósito estudiar el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa, para lo cual se evaluaron las bibliografías, trabajos de grado, artículos científicos e investigaciones anteriores y bases legales que se relacionan con el tema del presente proyecto.

2.1. Antecedentes de la investigación

Antes de establecer los elementos básicos que configuran el concepto de créditos indexados, resulta conveniente enumerar los aportes que han dado algunas experiencias anteriores internacionales y nacionales que han aplicado este proceso

2.1.1. Estudios internacionales

Tesis Doctoral presentado por José I. Perat Benavides (2006) titulado *Contribución al control de motores de reluctancia autoconmutados***,** de la Universitat Politécnica de Catalunya Departament D'enginyeria Eléctrica. En esta tesis se hacen contribuciones al control de los motores de reluctancia autoconmutados (switched reluctance motors) de potencias comprendidas entre 0.25 y 10 kW. Los objetivos desarrollaros fueron: realizar una breve introducción histórica del motor de reluctancia auto-conmutado en el contexto de los accionamientos eléctricos y se analiza su constitución, modelo y principio de funcionamiento; sus ventajas e inconvenientes, de sus principales aplicaciones

comerciales, así como de sus expectativas futuras; evaluar el estado del arte del control de los motores de reluctancia autoconmutados se estudian y comparan las distintas estructuras de los convertidores estáticos utilizados en este tipo de accionamientos y se hace una descripción de las distintas alternativas utilizadas para la detección de las corrientes y de la posición rotórica/velocidad; presentar las distintas estrategias de control que se pueden aplicar, al control de par medio, en los motores de reluctancia autoconmutados y se describen las distintas posibilidades de implementación de las citadas estrategias de control; se presenta un accionamiento para motor de reluctancia autoconmutado de bajo coste que permite regulación de velocidad y de par con ángulos de conmutación constantes; se presenta una plataforma para el diseño de accionamientos digitales para motores de reluctancia autoconmutados, utilizando como base una placa de control Dspace Ace kit 1104 CLP; g) se evalúa la influencia de las distintas alternativas de control digital que optimizan el rendimiento sobre el rizado del par y el ruido audible. Las teorías utilizadas fueron: Motor de reluctancia autoconmutado (SRM), accionamientos eléctricos, convertidor estático, interruptores de estado sólido, control analógico, control digital, procesador digital de señal (DSP), Matlab y Simulink. Metodológicamente se trata de un estudio experimental, sustentado en un análisis documental de carácter descriptivo. Se concluye que: Analizando los resultados obtenidos se puede observar que el control que provoca menor rizado de par al SRM, a una velocidad de 750 rpm y trabajando a media carga es el control que se obtiene aplicando las reglas de Bose y Gribble y el que mayor rizado de par produce es el control que utiliza la tabla optimizadora de rendimiento. Para este punto de funcionamiento el mejor rendimiento, se obtiene con la tabla optimizadora de rendimiento y el peor con el control con ángulos constantes. En cuanto a la presión sonora el mejor resultado se obtiene con el control con ángulos constantes (2º-38º) y el peor es el control con la tabla optimizadora de rendimiento. El aporte de este

estudio a la investigación se fundamentó las bases teóricas y en la metodología de la investigación. (Perat Benavides José I., 2006)

2.1.2. Estudios nacionales

Trabajo de Grado de Berny Josué Collado López (2016), 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 en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Este estudio tiene como objetivo 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. Objetivos específicos: a) 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; 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); y c) 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. Las bases teóricas

utilizadas fueron: Mantenimiento industrial, ingeniería de mantenimiento, planeación de mantenimiento, corriente eléctrica, circuito de corriente directa, circuito de corriente alterna y potencia eléctrica. Metodológicamente es un estudio e investigación utilizará una metodología de estudio exploratoria y experimental de tipo mixto, de tipo cualitativo documental. Se concluye que, siendo los materiales de mayor auge desde 1995 los plásticos, con una gran diversidad de aplicaciones, 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 VI 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. El aporte de este estudio a la investigación se orientó en las

fuentes documentales y método de análisis para desarrollar el estudio del reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa. (Collado López Berny Josué, 2016)

2.2. Evolución de la tecnología de lo motores eléctricos

> Los motores son dispositivos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica y son usados en infinidad de sectores industriales. Estos equipos hacen parte fundamental de los procesos de manufactura y con el tiempo han presentado avances significativos que le han permitido a ésta desarrollar procesos más sostenibles. (reporteroIndustrial.com, 2021)

La evolución de los motores eléctricos a lo largo del tiempo, han tenido sus variaciones; sin embargo, algunos autores hacen referencia de los motores desde 1705 y los primeros motores eléctricos datan de los años de entre 1828 y 1834. (Magdalani Jorge, 2021)

Los motores eléctricos son considerados como una gran alternativa en cuanto a sostenibilidad y tecnología en la actualidad; sin embargo, hasta los vehículos más modernos, cuentan con estos tipos de propulsores que no son nada nuevos.

En sus inicios, en el año 1705 los Ingenieros británicos Thomas Avery y Thomas Newcomen crean una máquina de vapor para bombear agua de las minas de carbón minutadas; mientras que en 1770 James Watt desarrolla la máquina de vapor más famosa del siglo XVII. (Magdalani Jorge, 2021)

Posteriormente, en el siglo XIX, se extiende el uso de la máquina de vapor, la cual era muy potente y peligrosa, y regularmente causaba accidentes y muertes. En el año 1800 Charles Parsons y Carter Levan inventan la máquina de vapor con turbina; luego en 1816 Robert Stirling, cansado de ver los accidentes generados por las explosiones de máquinas de vapor, desarrolla un motor llamado de aire caliente, hoy conocido como motor Stirling.

Seguidamente se evidencian nuevos motores, según reporteroIndustrial.com (2021):

- 1821: Michael Faraday construye el primer motor eléctrico utilizando inducción electromagnética.
- 1834: el ingeniero Moritz von Jacob presenta por primera vez los primeros motores eléctricos técnicamente utilizables.
- 1837: L. C. Davenport construyó el primer motor eléctrico para uso industrial.
- 1845: Charles Wheatstone reemplazó el imán permanente del motor por un electroimán, accionado por una batería externa. Así se logró un motor más efectivo.
- 1866: Werner von Siemens descubrió el principio del dínamo eléctrico y así creó la base para la ingeniería y el éxito de los motores eléctricos.
- 1873: durante la exposición industrial en Viena se conectó accidentalmente un generador de dínamo inactivo a un segundo generador de dínamo que ya estaba funcionando. El generador inactivo arrancó y funcionó como motor.
- 1888: Nikola Tesla introduce el concepto de corriente alterna y el motor.
- 1894: Westinghouse empieza a fabricar los motores de corriente alterna.

Del último motor eléctrico desarrollado por firmas como las BMW, Mercedes, Tesla, Audi y Honda hasta la primera vez que se puso en marcha unos

de estas características han pasado casi 200 años. Su origen se remonta a la década de los treinta del siglo XIX, mucho tiempo antes de que aparecieran los automóviles con motor de combustión, datados allá por el 1885. Su invención se la disputan varios ingenieros, pero todos parten de un mismo nombre: Michael Faraday. (Magdalani Jorge, 2021)

Faraday, parte toda una evolución de propulsores eléctricos. Este fue un físico británico que realizó una serie de investigaciones sobre el electromagnetismo, el principio de la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica. El físico, entonces, sumergió un alambre de hierro por un extremo en un envase lleno de mercurio en el cual introdujo un imán. Lo que consiguió fue algo importantísimo para aquella época: el alambre comenzó a rotar alrededor del imán en cuanto se le suministró una corriente eléctrica desde una batería química por el otro extremo.

A partir del siglo XX, se han activado otros avances, según ReporteroIndustrial.com (2021):

- 1906: fue introducida la primera línea de motores Ford de seis cilindros. La producción de este motor se detuvo un año más tarde que producía más energía que las que podía manejar.
- 1911: John Cornes desarrolla la más importante máquina de vapor desde la creada por James Watt, el sistema de regulación la hacía funcionar a un ritmo constante haciéndola ideal para la industria textil. El motor de Cornes, restaurado, fue instalado en un molino de azúcar en 1911.
- 1912: se impone el motor de combustión interna gracias a la adición de uno eléctrico, llamado motor de arranque.
- 1941: los motores eléctricos y el desarrollo de la electrónica adquieren relevancia durante la segunda guerra mundial.

- 1941: Ford volvió a lanzar los motores de seis cilindros en línea. El primer motor producido específicamente para la industria fue el motor diseñado de 254 pulgadas cúbicas (617,2 cc) el cual fue el Rogue 254 o Serie M.
- 1964: Ford introdujo la familia de motores de 240 y 300 pulgadas cúbicas (609, 6 y 762 cc). Ambos motores se utilizaron en un tamaño completo de automóviles, camiones ligeros, camiones pesados y aplicaciones industriales.
- 1965: SEW Eurodrive desarrolla el concepto modular de motor de engranajes.
- 1994: Siemens produce el motor 1.000.000.
- 1999: Ford presentó el motor industrial de V6, para una convención.
- Seguidamente Siglo XXI, en búsqueda de la eficiencia y con el uso de nuevas tecnologías, se observan otros avances:
- 2003: SEW - EURODRIVE introduce motores eficientemente energéticos con rotores de cobre.
- 2005: Ford anunció el diseño de motores industriales de combustible de hidrógeno de 4,2 litros (1,8 galones). Este motor pesa 70 libras (51,5 galones) menos que el motor de 4,9 litros (300 ci) y (2,2 galones). El peso más ligero permite una mayor gama de aplicaciones industriales.
- 2005: SEW-EURODRIVE presenta el MOVIGEAR, un sistema de accionamiento mecatrónico

Ya en el siglo XXI, Peugeot se centró de una frente mucho más prominente con la llegada del Peugeot iOn en 2009. Este modelo supuso el inicio de una revolución eléctrica en la década de los 2010s, en la que Peugeot se posicionó al frente de la tendencia de la industria, ejemplificada por modelos y proyectos actuales como el Citroën Amii, el Seat Mii eléctrico, nueva tecnología, nuevo potencial y, con ello, más oportunidades de negocio según ReporteroIndustrial.com (2021).

- 2012: la serie de motores de alta eficiencia IE2, de Siemens, son lanzados al mercado.
- 2013 Siemens lanza una nueva serie de motores SIMOTICS FD. Los cuales ofrecen más flexibilidad y alta potencia.
- 2012: la serie de motores de alta eficiencia IE2, de Siemens, son lanzados al mercado ().

2.3. Fundamentos teóricos

Como base para el desarrollo del Proyecto de Grado se tomaron en cuenta los elementos para las modificaciones, que ayudaron a la identificación de la problemática que se desea resolver, el planteamiento de soluciones y apoyo en mejoras que sean necesarias o requeridas por la empresa.

Durante el desarrollo de este proyecto fue necesario realizar varias actividades que lleven a la correcta selección, integración, montaje y puesta en marcha de los dispositivos seleccionados.

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.

2.3.1. Corriente 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 con 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.927).

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 & John A. 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.

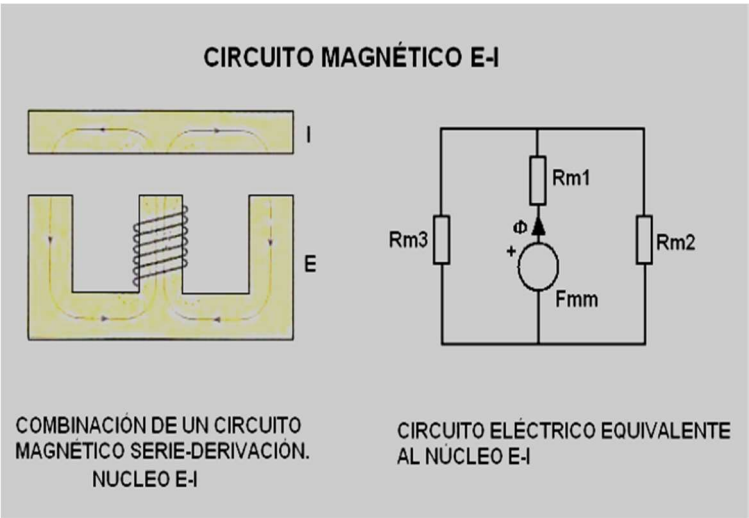
2.3.2. Circuito de corriente eléctrica

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 Vembu, 1990, p.3)

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. **Circuito magnético E-I**



Fuente: Cienciasfera (2021). *Circuitos Magnéticos*. Consultado el 10 de noviembre de 2021. Recuperado de http://cienciasfera.com/materiales/electrotecnia/tema07/6_circuito_magntico_paralelo_o_en_derivacin.html.

2.3.3. 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, p. 60). 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

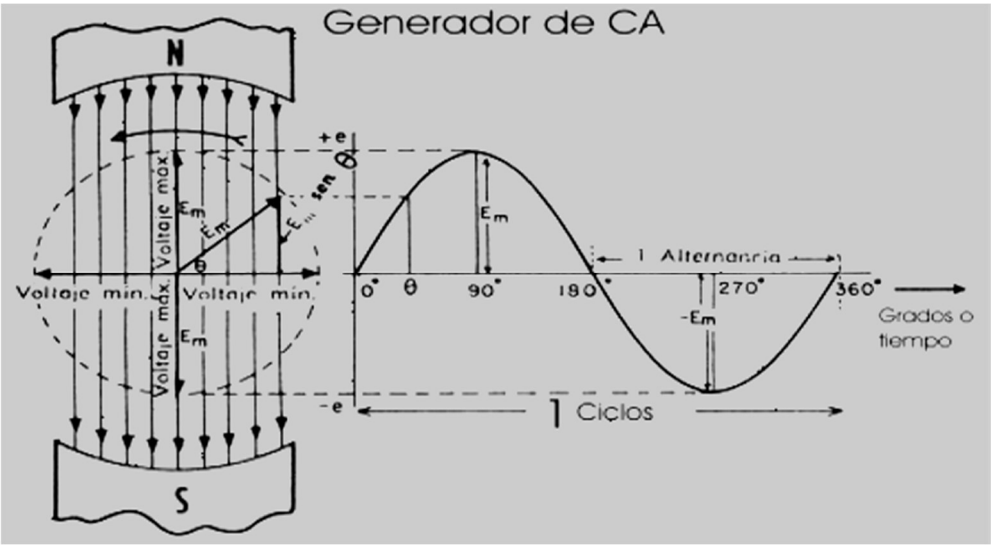
cuando están relacionados con muchos aparatos magnéticos, tales como: transformadores, motores y generadores. (Gourishankar Vembu, 1990)

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 Vembu, 1990)

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

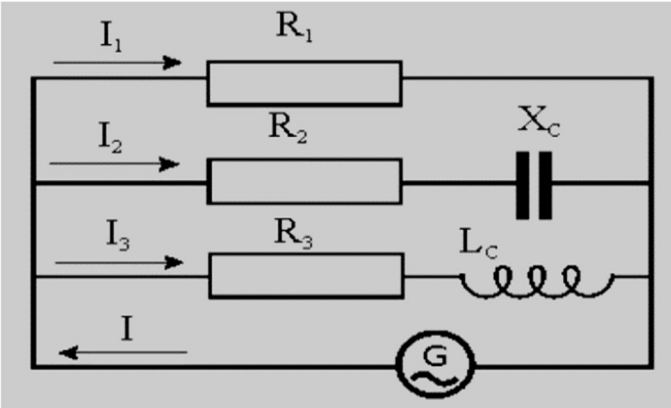
$$e(t) = E_{max} \operatorname{sen} \omega t \quad (1)$$

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



Fuente: Sapiens (2019). *Conceptos de Electrotecnia*. Consultado el agosto de 2019. Recuperado de www.sapiensman.com.

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



Fuente: GUIJARRO-GIL, Luis (2016). *Electrotecnia*. p. 16.

PAR (τ): en el movimiento circular la fuerza que se aplica a un elemento u objeto para modificar la velocidad de este, cuanto más grande sea el par aplicado al objeto mucho más rápido cambiará su velocidad angular. (Chapman, 2005, p.1-5)

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.

$\tau = rFsen(\theta)$ (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 S.J., 2005, p.23)

2.3.4. 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:

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

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 & Stevenson, 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.

$$P=\tau\omega \ (4)$$

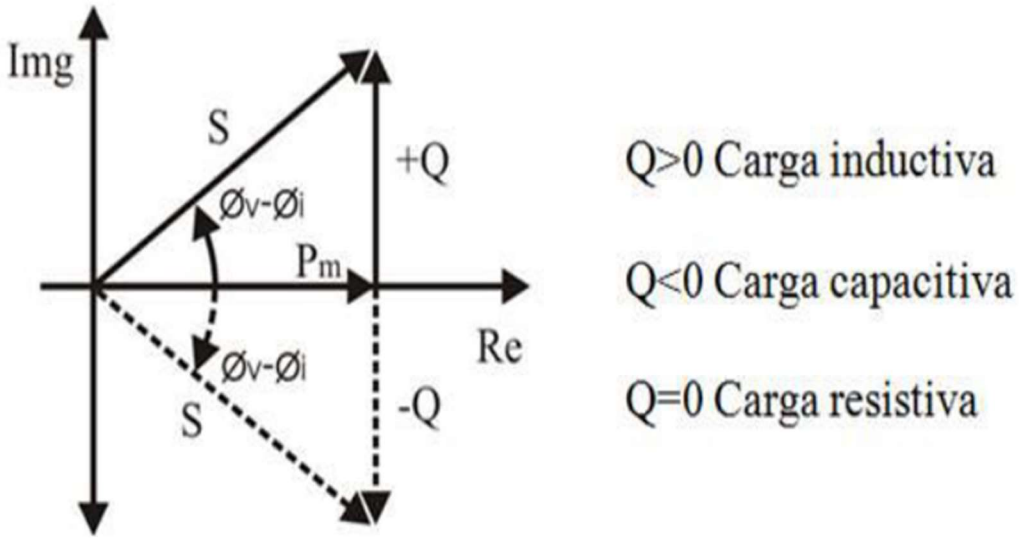
En los circuitos sinusoidales la definición de potencia se torna compleja, debido a que puede haber una diferencia de fase entre el voltaje y la corriente de CA suministrada a la carga. A esta diferencia de fase en los circuitos de CA aparecen tres tipos de potencia: Real, Reactiva y Aparente. (Chapman, 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 θ es P/|S|. (Grainger & Stevenson, 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 (2021). *Análisis de circuitos y sistemas lineales*.

2.3.5. 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 estos 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 J.S., 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 Vembu, 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.

2.3.5.1. Motores eléctricos

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

2.3.5.2. Máquinas de corriente continua (CC/DC)

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

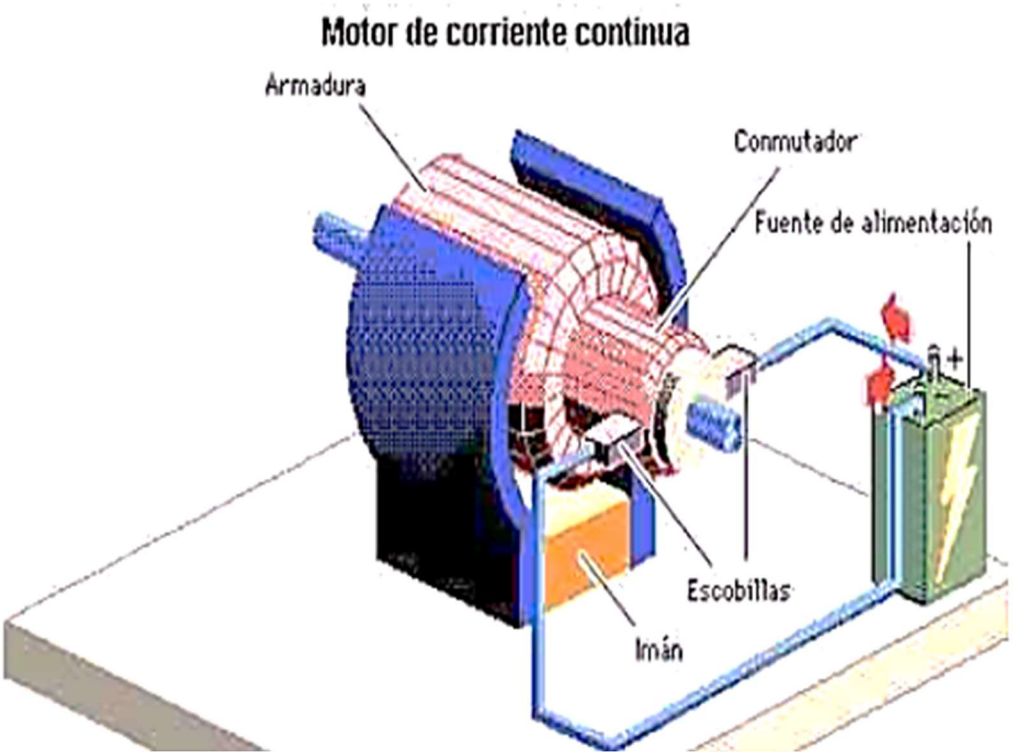
En general tienen el mismo principio básico de funcionamiento de las máquinas de corriente alterna AC, siendo un mecanismo llamado conmutador, que convierte los voltajes internos CA en voltajes CD en las terminales de conexión externa. Esto le da otros nombres a la máquina de corriente continua como 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 (2002). *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:

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

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 estos 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 S.J., 2005)

2.3.5.3. 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 J.S., 2002)

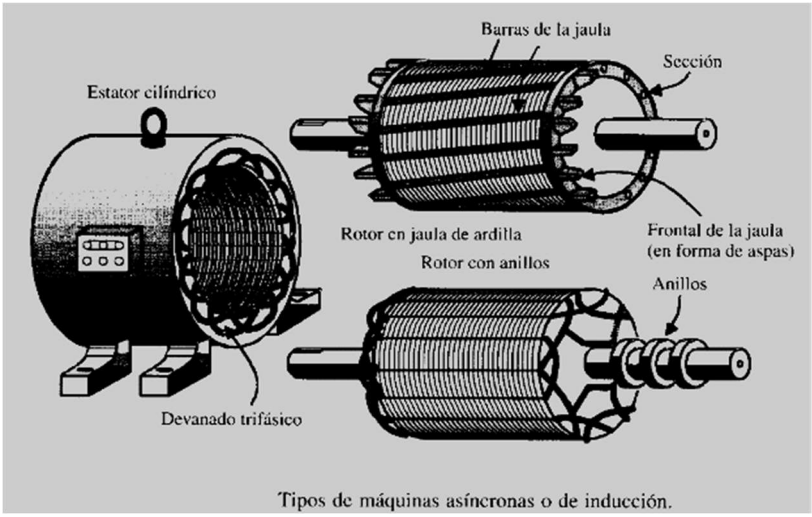
Los motores de inducción se alimentan de corriente alterna, suministrada directamente al estator, y a su vez induce corrientes en el rotor como se revisó

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, 1980)

Figura 6. **Máquina asíncrona**



Fuente: Electrotecnia aplicada a la ingeniería mecánica UD. 4 (2021). *Principios de electromagnetismo y funcionamiento y aplicaciones de las diferentes máquinas eléctricas*. Consultado el 22 de agosto de 2019. Recuperado de docplayer.es.

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.

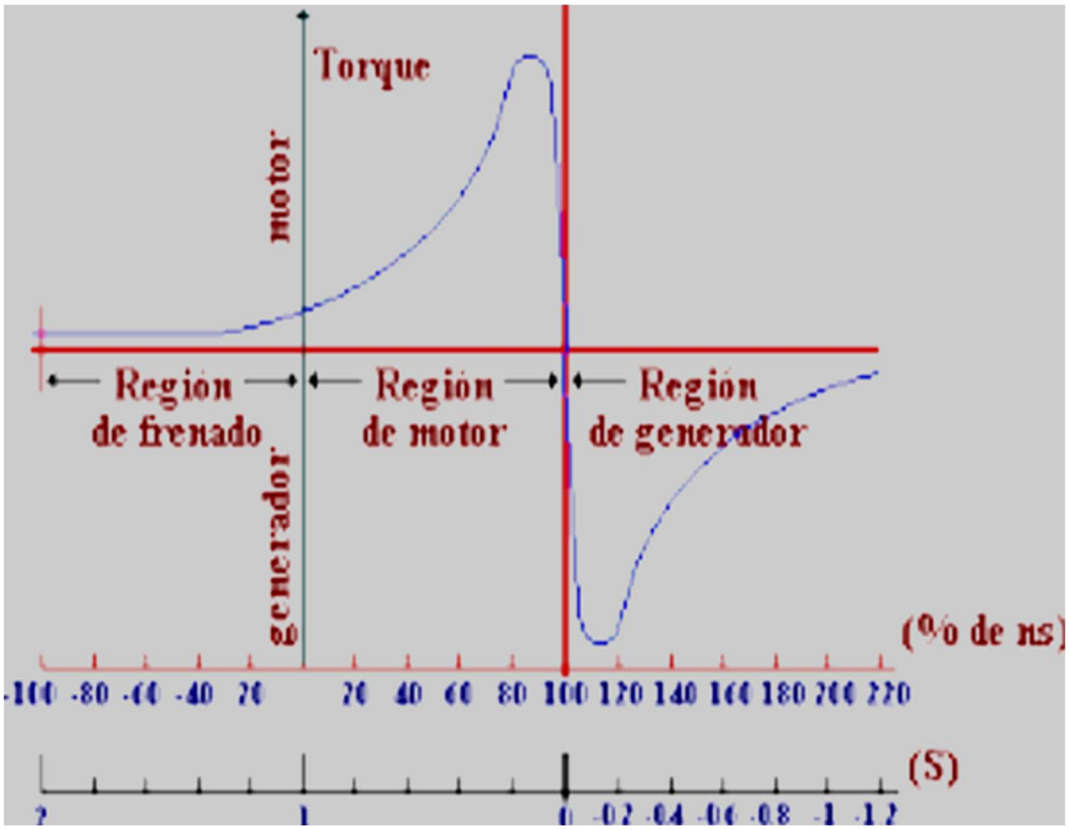
La máquina de inducción o de corriente alterna tiene tres zonas de trabajo representadas en la característica par-velocidad (o par-deslizamiento) para todos los valores posibles entre -∞ y +∞.

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

- -0 < Ω < Ω: Zona de funcionamiento como motor, corresponde al funcionamiento normal.

- Ω, < Ω < +∞: 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 (2021). *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Bio-Bio.*

2.3.5.4. 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 Vembu, 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-triangulo
- Arranque con arrancadores estáticos
- Arranque por inserción de impedancia

Uno de los principales problemas y por lo que en las aplicaciones que se han estudiado 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 J.S., 2002)

2.3.5.5. 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 se utiliza en la propuesta actualización de tecnología planteada en este estudio.

2.4. Principios básicos

En esta sección de la investigación, se establecen las teorías que sustentan el estudio, estructurada en los aspectos que conllevan a desarrollar los objetivos planteados.

2.4.1. Industria de empaque flexible

La industria plástica desde sus inicios hasta la actualidad es considerada entre las más importantes dentro del sector productivo del país. Esta industria tuvo su mayor crecimiento, en Guatemala, a mediados de los años 1970 hasta finales de 1980, en este lapso también existió un desarrollo en el mercado se inician las fábricas e industrias, se comienzan a utilizar nuevos materiales, como, por ejemplo: las poliamidas, producidas en coextrusión de tres (3) capas, que en un inicio se utilizaron para hacer telas para el agro, posteriormente se aplicarían para fabricar empaques de barrera, para vacío, etc. En este mismo marco Extrudoplast, es la primera empresa que trajo a Guatemala la primera Coextrusora de tres (3) capas.

La primer planta de plástico en general de Guatemala, fue Guateplast, fundada a fines de los años 40, por Jorge Rybar de origen Checoslovaco, y fue también la primera fábrica de plástico de toda Centroamérica. Empezaron con una línea de inyección para peines. Paralelamente se crea a fines de los 40, un centro de distribución de bolsas plásticas, que eran hechas en México. De a poco comienzan a fabricarse localmente, y nacen algunas industrias de *film* soplado, películas y empaques flexibles, y entre ellas está Extrudoplast, fundada por el Dr. Imrich Fischmann junto al señor Félix Valdez (1955).

Los primeros equipos de extrusión que comienzan a ingresar a Guatemala para *film* soplado son principalmente de Estados Unidos, como Sterling. Es algún tiempo después que comenzaron a ingresar las primeras coextrusoras, que al inicio solamente eran para dos capas. Desde sus comienzos, la empresa desarrolló la confección de bolsas industriales, para ello trajeron las primeras máquinas semiautomáticas, para confeccionar sacos con soldadura lateral. La bolsa valvulada comienza a fabricarse posteriormente, en la década del 80.

Incursionando en un mercado nada desarrollado de impresión de plásticos, para el año 1965, se trae a Guatemala, tal vez la primera máquina de impresión flexográfica, una Windmöller & Hölscher alemana. En el caso de impresión rotograbado, no había grabación de cilindros en el país, había que mandarlos grabar fuera. (Castillo Umaña Hugo, 2007)

La industria del plástico en general comienza a desarrollar poco a poco nuevos productos, notándose principalmente plásticos rígidos en el mercado. Inicialmente se fabricaba polietilenos de alta y baja para empaque tanto para la sal inglesa como el sulfateasol.

Posteriormente, comenzó tímidamente la producción de películas para el agro, para empacar el banano, se comenzó con los invernaderos, también hacían lienzo para empaque. Se hizo la bolsa para almácigos, siendo uno de los pioneros a nivel mundial. Luego se trabaja películas para envasado automático, primero arroz pre-cosido y azúcar. Cuando inician las exportaciones en la región de Centroamérica, lo que se vendía eran banderas para las fiestas de la independencia.

En cuanto al material plástico en sí, las primeras resinas que se recibían en Guatemala no venían con mucha diferencia de melt index, eran grado 7, es decir se usaban tanto para extrusión como inyección, y permitía solamente extrudir películas de hasta 40 micrones. Una de las resinas típicas de la época para film era el alkathene, sobre todo para usos agrícolas. (Castillo Umaña Hugo, 2007)

Además del *film*, Extrudoplast fue el pionero en hacer los poliductos, tanto de polietileno reciclado para electricidad, como de material virgen si era para agua. Para la fabricación de estos poliductos, nace la primera fábrica de tubos

de PVC de Guatemala, TuboVinil, que tiene un rápido despegue. Al morir el Dr. Fischmann, fundador de Extrudoplast, se vende al grupo Amanco (Castillo Umaña Hugo, 2007).

Se puede decir entonces, que es propio al desarrollo de los distintos mercados, el crecimiento de los supermercados, que además de los locales existe una serie de cadenas internacionales que se instalaron en el territorio nacional y a partir de ese hecho y en este período el crecimiento de esta industria se ve al alza. Ya por este período, da comienzo una competencia que no pasó desapercibida, entre el plástico y otros materiales, particularmente contra el vidrio, esta misma competencia por muchos temas implícitos como, por ejemplo: ambientales, ecológicos, comerciales, entre otros, se mantiene hasta este tiempo.

El crecimiento más grande es a mediados de la década del 70 hasta finales del 80. Durante este período creció el triple. También hay un desarrollo en el mercado y se fundan industrias, y se comienza a utilizar nuevos materiales, como por ejemplo las poliamidas, producidas en coextrusión de 3 capas, que en un inicio se utilizaron para hacer telas para el agro, posteriormente se aplicarían para fabricar empaques de barrera, para vacío, entre otros. La primera coextrusora de tres capas la trajo a Guatemala Extrudoplast. Todo esto es consecuencia del desarrollo de los distintos mercados, como por ejemplo el crecimiento de los supermercados, que además de los locales hubo una serie de cadenas internacionales que se instalaron aquí. A partir de ese período el crecimiento es constante. Esa época fue muy representativa. En la década de los 80 comienza una lucha muy fuerte, entre el plástico y otros materiales, particularmente contra el vidrio, y así sigue hasta hoy.

Por otra parte, la popularidad en aumento por los envases flexibles es una tendencia que destaca en la industria alimentaria. Euromonitor International, líder mundial en la estrategia de investigación para los mercados de consumo, en 2012 indica que la producción alcanzó más de un billón de unidades, lo cual representa el 59 % del volumen del mercado de empaques. La característica de adaptabilidad y versatilidad del envase flexible, junto con su extenso uso en diversas categorías de alimentos, demuestra reforzar su posición y preferencia en la manufactura alimentaria.

Actualmente existe una variedad de envases flexibles, donde se puede encontrar películas de plástico, de aluminio y multicapas (combinación de dos o varios materiales). Pero el desarrollo más espectacular adopta la forma de bolsa vertical flexible, conocida en el mercado como stand-up pouch, opción que invade las estanterías en los supermercados por ser más ligeras y menos voluminosas.

Según datos de la asociación Plastics Europe, para el año 2019, la producción de plásticos en el mundo alcanzó los 368 millones de toneladas, nueve toneladas más que en el año anterior. La mayor producción de plástico en el mundo se estructuró de la siguiente forma: China con el 31% seguido de américa central y norte con el 19 %, Asia el 17 % Europa el 16 % Oriente Medio y África el 7 %, América Latina el 4 % y CEI y Japón con el 3 % (Mena Roa Mónica, 2021).

En Asia se produjeron algo más de la mitad de los plásticos del mundo (un 51%). China, que en 2019 fue el país que más residuos plásticos de un solo uso generó, fue responsable del 31 % de la producción mundial de plásticos, fabricando 82 kg per cápita, mientras que Japón, con solo el 3 % de la producción mundial, logró producir 88 kg. En los países del TLCAN (actual T-MEC), es decir, Canadá, Estados Unidos y México, solo se produjo el 19% del plástico mundial

en total. Sin embargo, esto equivale a 141 kg per cápita, la cifra más alta por persona. (Mena Roa Mónica, 2021)

Así también en el escenario de una pandemia los empaques flexibles toman un repunte en producción y demanda, ya que, en todo el mundo, en este marco, cada vez más se buscan productos y alimentos empacados de forma inocua, listos para consumir.

2.5. Máquinas para extrusión (de película soplada)

Antes de hablar sobre las máquinas para extrusión es importante que se conozca lo que significa extruir.

La palabra extruir, en el contexto estudiado, extrusión de películas sopladas o (*blow film*), significa dar forma a una masa plástica haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta. La masa plástica puede ser de naturaleza metálica, polimérica, cerámica, entre otras.

En una definición amplia el proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida. Además de los plásticos, muchos otros materiales se procesan mediante extrusión, como los metales, cerámicas o alimentos, obteniéndose productos muy variados como son marcos de ventanas de aluminio o PVC, tuberías, pastas alimenticias, etc. Desde el punto de vista de los plásticos, la extrusión es claramente uno de los procesos más importantes de transformación. El proceso de extrusión de plásticos se lleva a cabo en máquinas denominadas extrusoras o extrusores. Aunque existen extrusoras de diversos

tipos, las más utilizadas son las de tornillo o de husillo simple, por lo que haremos referencia a ellas continuamente. (Beltrán Rico M. & Marcilla Gomis A., 2012)

En este proceso de extrusión, generalmente, el polímero se alimenta en forma sólida y sale de la extrusora en estado fundido. En algunas ocasiones el polímero se puede alimentar fundido, procedente de un reactor. “En este caso la extrusora actúa como una bomba, proporcionando la presión necesaria para hacer pasar al polímero a través de la boquilla. En otras ocasiones se extruyen los materiales sólidos, como es el caso del procesado de fibras en el que se requieren elevadas orientaciones en el material” (Beltrán Rico M. & Marcilla Gomis A., 2012).

De lo anterior dicho, se puede afirmar que Extrusor o Extrusora es la máquina que se puede utilizar para extruir.

Con lo descrito anteriormente se puede pasar a la siguiente afirmación y es que la extrusion de película soplada o película tubular es el método más común para la fabricación de películas o *films*, y de forma general se utiliza para fabricación de bolsas de plásticos termoplásticos. Más de la mitad de las películas producidas hoy en día se hacen de polietileno, en su mayoría de baja densidad. El polipropileno es otro de los materiales ampliamente utilizados. El término película se refiere a espesores por debajo de 0.5 mm, estos espesores se usan para películas delgadas regularmente para materiales de empaque (envolturas, bolsas para abarrotes y bolsas de basura); en contraposición para las aplicaciones de películas más gruesas las cuales incluyen cubiertas y revestimientos, por ejemplo, cubiertas para piscinas y revestimientos para canales de irrigación. Es importante mencionar y aclarar que mediante el proceso de extrusión de película soplada de forma general se pueden obtener espesores de película de ~10 a 250 micrones. (Marcilla B., 2012)

Dentro de la clasificación de máquinas para extrusión se pueden encontrar el mono capa y multicapa o lo que sería igual de un tornillo y múltiples tornillos extrusores.

Figura 8. **Línea de extrusión**

Fuente: Todo en polímeros. (29 de septiembre de 2017). *Película soplada*. Consultado el 10 de octubre de 2019 Recuperado de https://todoenpolimeros.com/2017/09/29/pelicula-soplada/ (todoenpolimeros.com, 2017).

Las extrusoras de un tornillo o monocapa son las que están equipadas con un tornillo trabajando coordinadamente. Su construcción y tamaño se designan internacionalmente mediante códigos numéricos.

Las extrusoras multitornillo requieren más engranajes y rodamientos de empuje en la caja de mecanismos y una sección del cilindro adecuada al tipo de tornillo. La potencia se suministra mediante motores conmutadores infinitamente variables o regulados por tiristores que controlan su velocidad.

2.6. Tipos de máquinas para extrusión

Este tipo de máquina tiene como función elaborar el trabajo de transportar, moldear y dar forma al polímero en caliente o frío por compresión; en específico para darle la forma final.

2.6.1. Extrusoras monocapa y multicapa

Las extrusoras de un tornillo o monocapa son las que están equipadas con un tornillo trabajando coordinadamente. Su construcción y tamaño se designan internacionalmente mediante códigos numéricos. (Fermín, 1997)

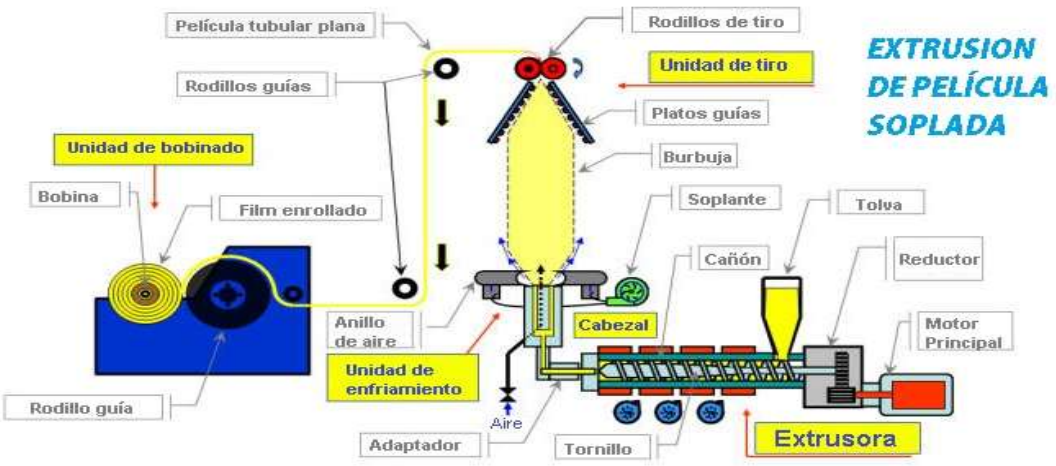
Las extrusoras multitornillo requieren más engranajes y rodamientos de empuje en la caja de mecanismos y una sección del cilindro adecuada al tipo de tornillo. La potencia se suministra mediante motores conmutadores infinitamente variables o regulados por tiristores que controlan su velocidad. (Fermín, 1997)

En este apartado se centra la atención en las maquinas Mono Capa o mono husillo, ya que es sobre una de estas máquinas, en la cual se realizarán las modificaciones.

2.6.2. Extrusión mono-husillo

La extrusora mono husillo para plastificación tiene tres funciones: transportar el material sólido, plastificarlo e incrementar la presión del material fundido, para que éste pueda fluir a través del dado de extrusión.

Figura 9. **Línea de extrusión**



Fuente: Marcilla B. (2012). *Tecnología de los plásticos*. Consultado el 10 de octubre de 2019 Recuperado de https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/04/extrusion-de-pelicula-soplada.html.

Para comprender mejor el proceso a continuación se detallarán los componentes que integra este tipo de máquinas utilizando para ello en primer lugar la figura 9, donde se aprecia un esquema general de los elementos que componen las extrusoras, luego se verán las partes específicas de la maquina sobre la cual se realiza este estudio.

De las generalidades acerca de las máquinas y los procesos de extrusión se da paso a este tema de estudio específico, esto es, el extrusor Mono-Husillo que se muestra en la figura 10.

Figura 10. **Extrusora mono-husillo**

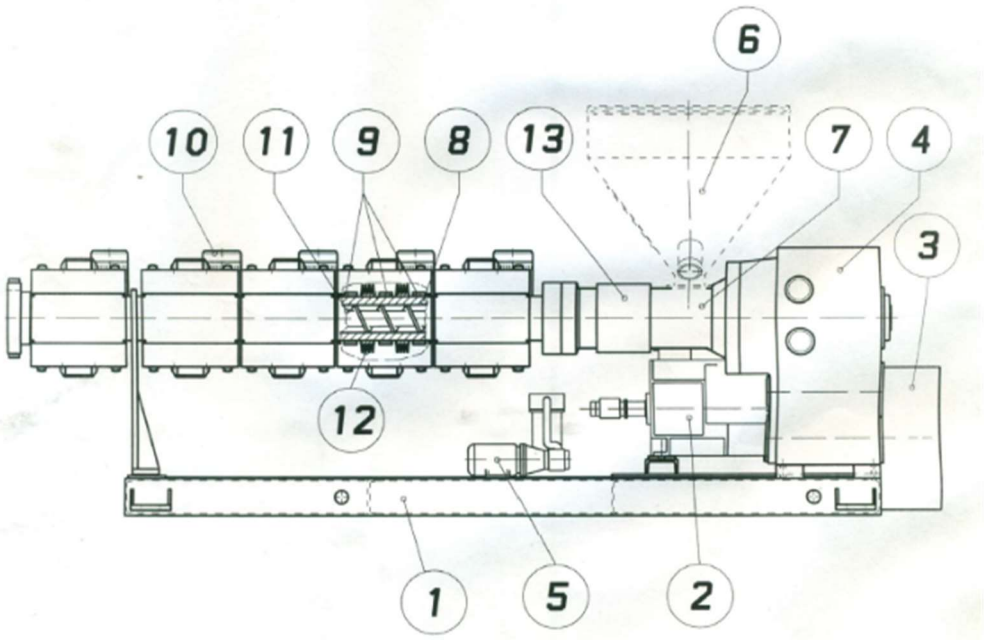
Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Información técnica de la maquina sobre la cual se trabaja en la presente investigación, para el cambio de tecnología:

- Extrusora Mono-Husillo TR.85.AFS/30D
- Año de fabricación: 2000
- Fabricante: Luigi Bandera
- Lugar de Fabricación: Italia.
- Información de que materiales puede extruir: LDPE (polietileno de baja densidad) y LLDPE (polietileno de baja densidad lineal)
- Altura:13.5 mts
- Área ocupada: 65.35 mts²

En la figura 11 se aprecian los componentes principales del extrusor Mono-Husillo. En esta sección es donde se realiza el cambio de tecnología, es decir, de motor DC a motor AC. Esto no implica que sean las únicas partes, por lo cual se realiza una breve descripción de las demás partes que componen toda la máquina.

Figura 11. **Extrusor mono-husillo**



Fuente: Bandera L. (2000). *Elementos constructivos*. Recuperado de Manual de instrucciones Luigi Bandera Volumen 1.

- Bancal
- Motor.
- Correas y poleas.
- Reductor.
- Centralita de enfriamiento.
- Tolva de carga.
- Boca de alimentación
- Cilindro de extrusión.
- Resistencias eléctricas.
- Ventiladores.
- Husillo de extrusión.
- Anillos disipadores de calor.
- Resistencia eléctrica.

En la figura 11, se representa de forma simplificada el diseño del extrusor Mono-Husillo, en donde se aprecian todas las partes que conforman la máquina,

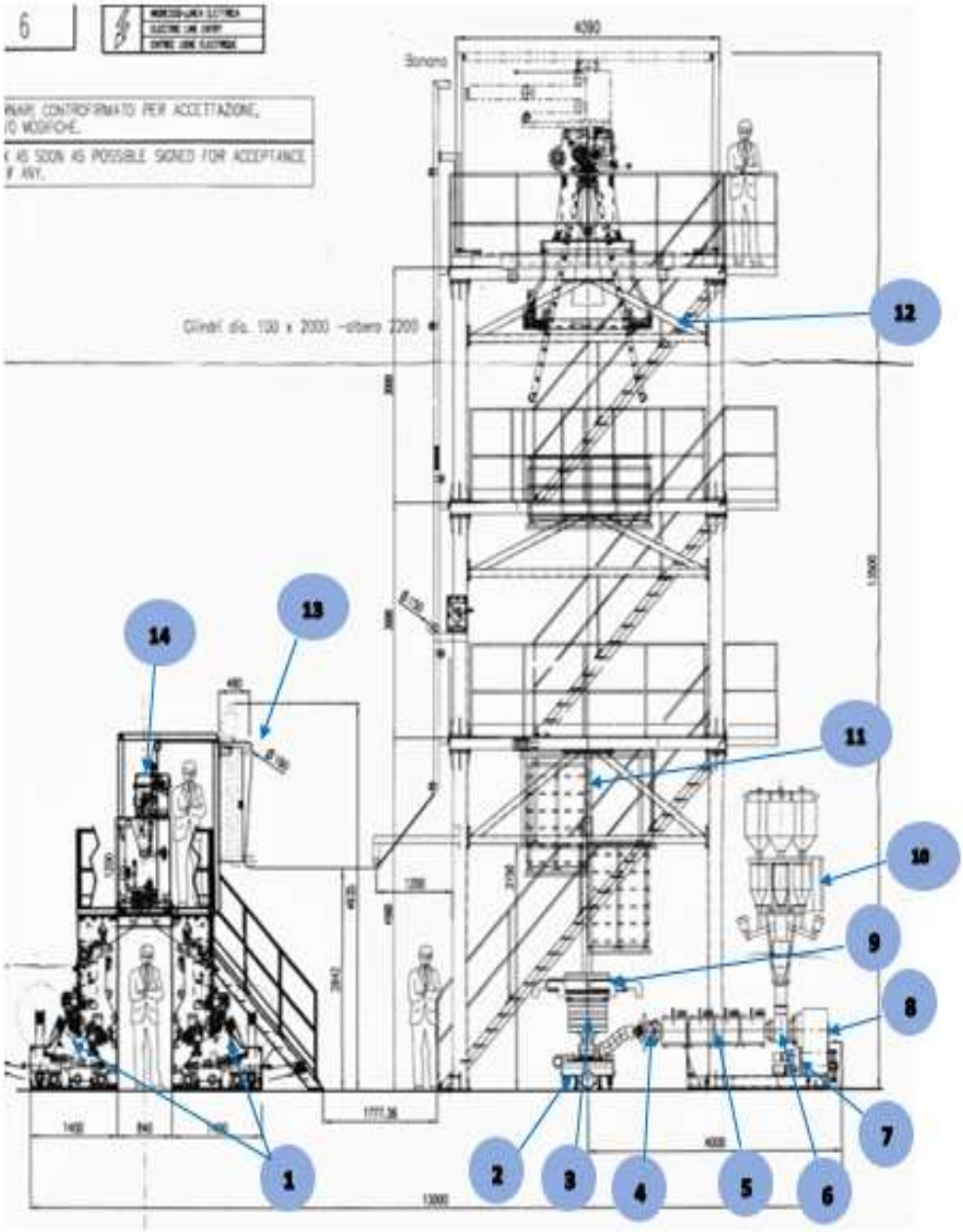
se desarrolla una explicación simplificada de cada uno de los componentes y su función.

Algunas de las funciones de una extrusora de hoy son:

- Alimentar y transportar el material en estado sólido: gránulos, pellets o polvo
- Compactar el material sólido
- Fundir el material sólido
- Generar el nivel de presión necesario para vencer la restricción del cabezal
- Lograr una homogeneidad física y térmica del material fundido
- Extracción de humedad, volátiles o gases del material fundido
- Producir un extruido de forma continua, sin variación dimensional y cumpliendo con todas las especificaciones de calidad

La anterior descripción está representando un equipo multitarea con altos requerimientos y, por ende, especificaciones. Por lo anterior es importante optimizar la maquinaria de extrusión y si es posible actualizarla.

Figura 12. **Diseño extrusor mono-husillo**



Fuente: Bandera L. (2000). *Elementos constructivos*. [Figura]. Consultado el 22 de agosto de 2019. Recuperado de Manual de instrucciones Luigi Bandera Volumen 1.

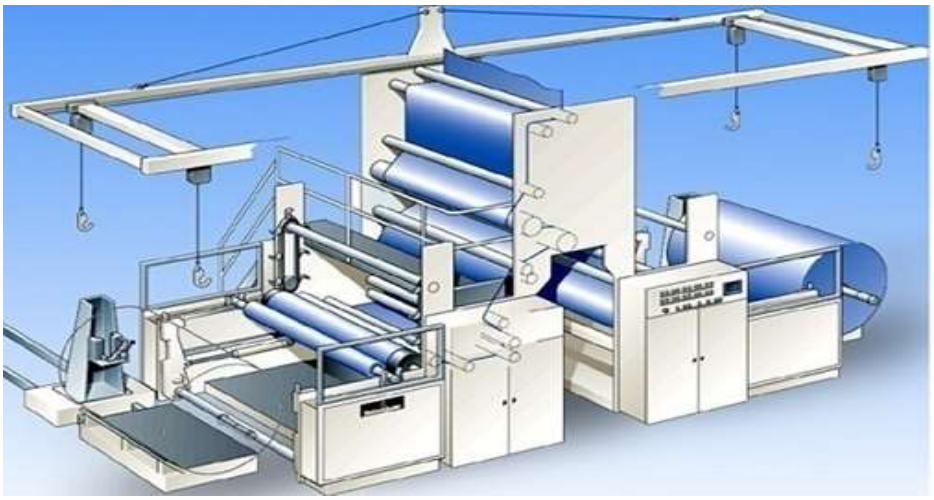
- Unidad embobinadora
- IBC
- Cabezal de extrusion
- Cambiador de filtros
- Cilindro de extrusión
- Boca de alimentación
- Motor
- Reductor
- Anillo de enfriamiento
- Dosificador gravimétrico
- Persiana
- Torre de tiro
- Guiadora de film
- Tratador por efecto corona

2.6.2.1. Unidad embobinadora o enrolladora

La unidad embobinadora o enrolladora es el dispositivo que tiene la capacidad de enrollar el material extruido para luego entregarlos a otras lineas de producción las cuales pueden ser impresión, corte o formado de empaques. (Bandera L., 2000)

En la figura 13, se muestra un bobinador de contacto, que es el que utiliza la Extrusora Luigi Bandera, el cual tiene un eje que porta el núcleo sobre el cual se enrollara la bobina, llamado rodillo de película, este no está motorizado, pero gira por la transmisión del movimiento de otro rodillo, sobre el cual se recarga y que cuenta con un motor el cual le proporciona movimiento rotacional, este rodillo recibe el nombre de rodillo de contacto.

Figura 13. **Bobinador de contacto**

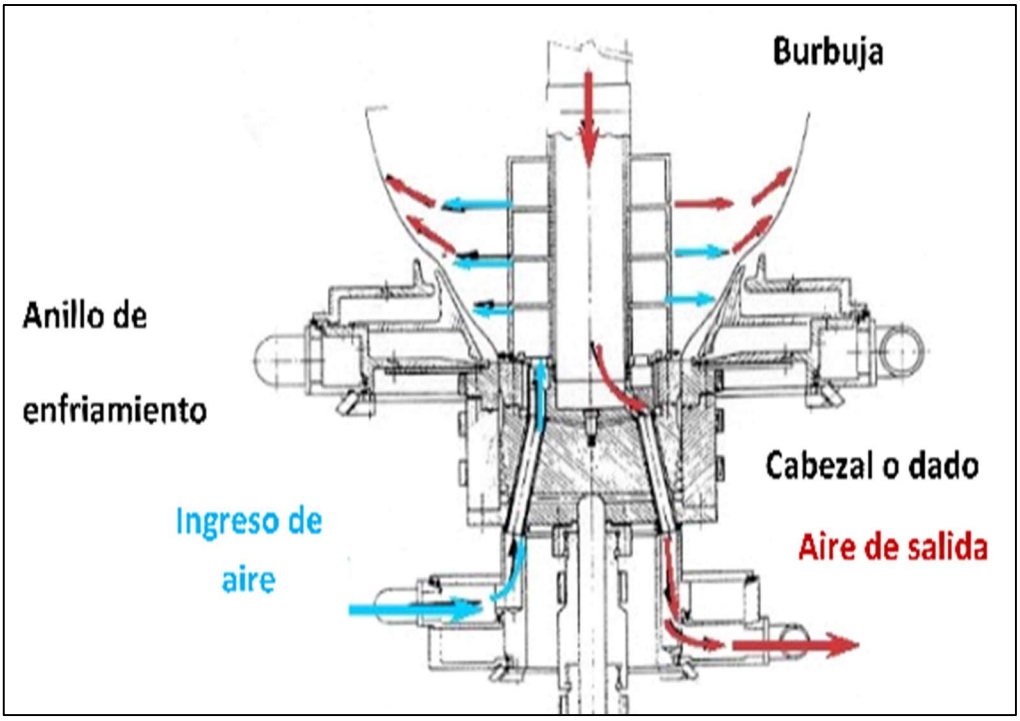


Fuente: Marcilla B. (2012). *Tecnología de los plásticos*. Consultado el 11 de noviembre de 2019. Recuperado de https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/04/extrusion-de-pelicula-soplada.html.

2.6.2.2. IBC (Internal Bubble Cooling)

IBC (Internal Bubble Cooling) significa Enfriamiento forzado de la burbuja, la función principal es reemplazar el aire caliente del interior de la burbuja por aire frío, el intercambio de aire frio por aire caliente se aprecia en la figura 14. Esto proporciona un aumento de la velocidad de extrusión ya que el enfriamiento del *film* es más rápido. Este aire es eficaz, ya que ayuda a estabilizar la burbuja, pero agrega un inconveniente y es que genera turbulencias y la burbuja se vuelve inestable. Por tal razón con un sistema IBC, es imprescindible el uso de una cesta guía o canasta guía.

Figura 14. **IBC (Internal Bubble Cooling)**

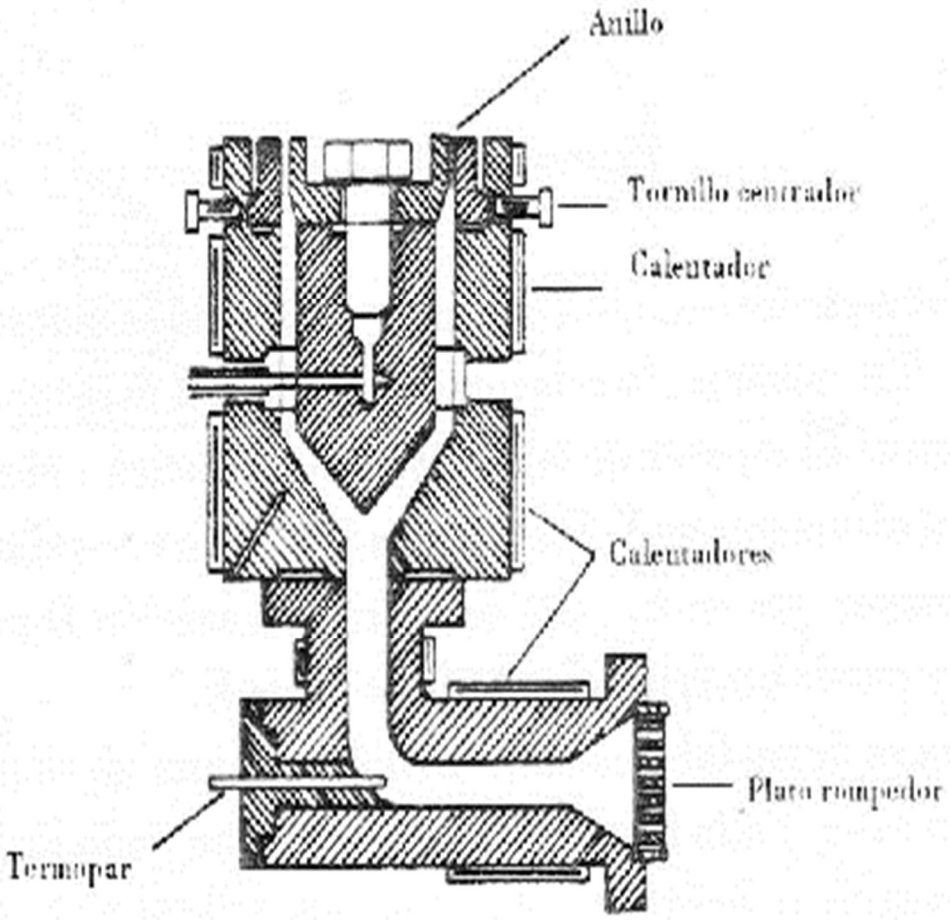


Fuente: Butler T. (2020). *Introduction To Blow Film*. Consultado el 10 de noviembre de 2020. Recuperado de https://slidetodoc.com/introduction-to-blown-film-thomas-i-butler-blown/.

2.6.2.3. Cabezal de extrusión

El cabezal de extrusion es el dispositivo que tiene la tarea de distribuir de forma uniforme, además trasportar de forma precisa la masa plástica, y la última característica, pero no menos importante es que debe de realizarlo en cortos intervalos de cambio de color para todos los plásticos de moldeo por soplado, esto para evitar que la masa plástica se degrade dentro del cabezal y produzca daños en la estructura o apariencia de la película soplada. En la figura 15, se muestra la forma constructiva básica.

Figura 15. **Cabezal de extrusión**



Fuente: Rigail A. *Esquema de dado*. Consultado el 5 de noviembre de 2019. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Esquema-del-dado-Existen-dos-relaciones-importantes-en-la-fabricacion-de_fig2_266244950.

2.6.2.4. Cambiador de filtros

Todos los sistemas de extrusion de película soplada cuentan con un portafiltros, también conocido como “breaker plate”, entre el final del husillo y el dado. Este usualmente es un disco con perforaciones, que cumple las siguientes funciones. figura 16.

- Sirve de soporte para las mallas filtrantes y la detención de impurezas o de material no plastificado.
- Transforma el fluido rotacional del plástico fundido, procedente de la zona del husillo, en flujo lineal, paralelo al eje de este.
- Regula las caí5das de presión dentro de los límites permisibles para asegurar la homogeneidad del flujo reológico.

Figura 16. **Cambiador de filtros**

Fuente: Macnamara, D. (2015). *Extrusión*. Consultado el 12 de noviembre de 2019. Recuperado de https://www.pt-mexico.com/articulos/extrusion-mantenga-su-cambiador-de-mallas-en-funcionamiento.

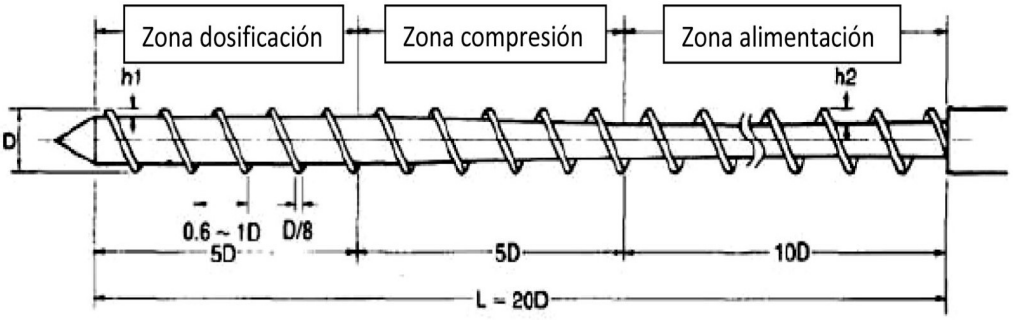
2.6.2.5. Cilindro de extrusión

El cilindro de extrusion (ver figura 12) desempeña la función de proporcionar una superficie donde se genere el cizallamiento del material y también permite la transmisión de calor desde y hacia el material. Los materiales con que se construye son de alta resistencia al desgaste por fricción en caliente y con una excelente resistencia a la corrosión.

Alrededor del cilindro de extrusión se disponen elementos de calefacción y también elementos de refrigeración con el propósito de proporcionar en todo tiempo las temperaturas adecuadas en las distintas zonas para el polímero.

Dentro del cilindro de extrusion este contenido el husillo de extrusión o tornillo, que puede ser considerado como el componente principal de la extrusora, este debe de trasportar el material sin fundir desde la garganta de alimentación hasta el dado a la temperatura adecuada y con total homogeneidad. Estos se componen de tres partes básicas: zona de alimentación, zona de transmisión y zona de dosificación, esto se aprecia en la figura 17.

Figura 17. **Husillo**



D= diámetro del husillo

L= Longitud efectiva del husillo ... Compresión ratio h2/h1

Fuente: Lerma J. (11 de Julio de 2017). *El Mecanismo del Husillo*. Consultado el 10 de noviembre de 2019. Recuperado de https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/159596-El-mecanismo-del-husillo.html.

2.6.2.6. Boca de alimentación

La boca de alimentación es la zona por donde ingresa el material al husillo desde la tolva o dosificador gravimétrico, esta debe de tener la forma adecuada para permitir el flujo de la materia a fundir, (ver figura 12).

2.6.2.7. Motor

Es el encargado de trasformar la energía eléctrica en energía potencial que permita realizar un trabajo rotacional en el husillo a través del reductor. En las máquinas de extrusion se utilizan dos tipos, de corriente directa DC y de corriente alterna AC, aunque este último en la actualidad es el más utilizado debido al avance de la tecnología que ha permitido realizar por medios

electrónicos el control de velocidad, según los distintos regímenes de trabajo de requiera una máquina de extrusión.

2.6.2.8. Reductor

El reductor de velocidad es utilizado para controlar y variar las revoluciones por minuto RPM, del motor del extrusor, esto con el objetivo de proporcionar las revoluciones por minuto adecuadas al proceso de extrusión. (figura 12)

2.6.2.9. Anillo de enfriamiento

El material extruido al salir del cabezal debe de recibir un enfriamiento superficial mediante una corriente de aire frio, y este proviene del componente llamado anillo de enfriamiento figura 18, este componente proporciona un flujo de aire laminar a la burbuja para aumentar la eficiencia de enfriamiento dar estabilidad mecánica a la burbuja.

Figura 18. **Anillo de enfriamiento**

Fuente: DZM De Zubiria Maquinaria. (2015). *Anillo de aire*. Consultado el 10 de noviembre de 2019. Recuperado de https://www.elempaque.com/temas/Anillo-de-aire-de-labio-doble-ME-10B-8-1-D10-1-que-provee-flujo-uniforme+108245.

2.6.2.10. Dosificador gravimétrico

Son diseñados para realizar cambios frecuentes en la producción proporcionando con esto una detallada visualización de lo muchos y diferentes parámetros utilizados.

Los dosificadores gravimétricos controlan automáticamente la línea de extrusión desde la interfaz hombre máquina, permitiéndole a este ultimo la observación grafica de la información y el control de la información y control de cada uno de sus partes, (figura 19).

Figura 19. **Dosificador gravimpetrico**

Fuente: Kahl Group 2021. *Dosificadores Gravimetricos*. Consultado el 10 de noviembre de 2019. Recuperado https://kahl.com.ar/dosificadores-gravimetricos/.

2.6.2.11. Persiana

Cuando la burbuja se ha estabilizado gracias a la ayuda del anillo de enfriamiento, esta tiende a moverse a la derecha o izquierda, hasta llegar a la persiana o canasta guía quien le ayuda a darle estabilidad hasta llegar a los rodillos de arrastre de torre, ver figura 12.

2.6.2.12. Torre de tiro

La torre de tiro incluye un marco de colapsamiento de burbuja y un rodillo de presión y jalado de película, la primera parte de la unidad tiene contacto con la película en forma de burbuja a una forma plana por medio de una disminución constante en el área de paso, ver figura 12.

2.6.2.13. Guiadora de *film*

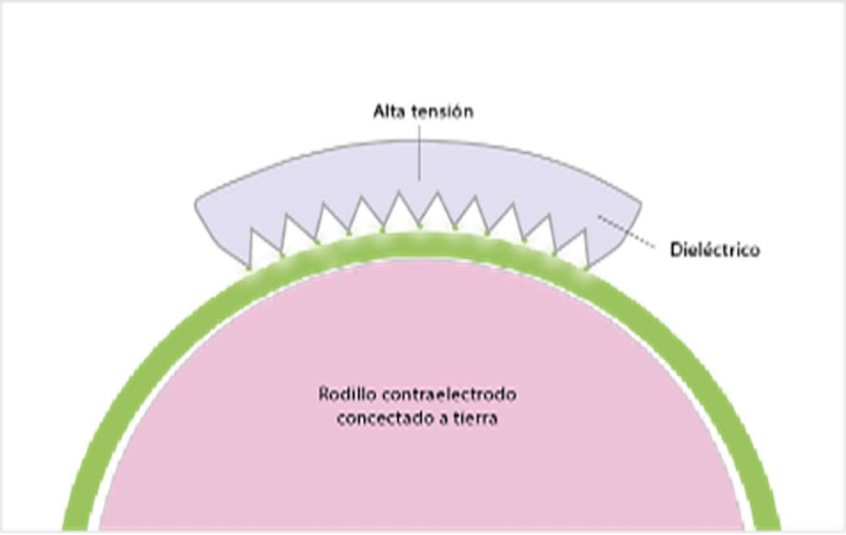
La película plástica después de pasar por la torre de tiro llega a la unidad de guiado ya en forma aplanada, es necesario que pase por esta etapa ya que la película lleva refilamiento (se denomina así al corte de película no útil para realizar el producto terminado) en la etapa de bobinado, de aquí la necesidad de darle estabilidad en el guiado antes del bobinado, ver figura 12.

2.6.2.14. Tratador por efecto corona

La película plástica posee una superficie impermeable y químicamente inerte, esta presenta baja tensión superficial lo que permite que la superficie no sea receptiva para que se adhiera sustratos, tintas para imprimir, adhesivos y recubrimientos.

Para promover que la superficie de la película sea receptiva se somete a un tratamiento por efecto corona el cual aumenta la energía de la superficie, este proceso da mejores resultados si se realiza durante el proceso de extrusión, de ahí la importancia de este dispositivo en la máquina de extrusión.

Figura 20. **Tratamiento por efecto corona**



Fuente: Melnik. (2021). *El tratamiento corona*. Consultado el 10 de noviembre de 2019. Recuperado http://www.melnik.es/index.php/es/procesabilidad/sistemas-de-impresion/sistemas-de-impresi%C3%B3n.

2.7. Motores eléctricos empleados en extrusión

El motor de la extrusora es el componente del equipo responsable de suministrar la energía necesaria en el tornillo o husillo para tres aspectos importantes:

- La alimentación de la resina
- Parte de su fusión

- Su trasporte y el bombeo a través del cabezal y la boquilla.

Un criterio ampliamente utilizado, en base a la observación y experiencia de los constructores de este tipo de máquinas, para determinar la potencia del motor es.

$$Potencia\ del\ motor\ (HP) \cong Volumen\ de\ salida\ \left(\frac{lb}{hr}\right) \div 5$$

Los tipos de motores eléctricos para estos procesos pueden ser de corriente directa (DC) o de corriente alterna (AC). Tradicionalmente los motores de DC con regulación de velocidad mediante control de voltaje eran los más populares, esto porque ofrecían la potencia y control necesario a un bajo costo. Sin embargo, con los recientes avances en el control de frecuencia, técnica utilizada para regular la velocidad en los motores AC, este tipo de motores a llegado a convertirse en el más ampliamente utilizado.

Es importante mencionar al reductor de velocidad, ya que los motores, independientemente si son AC o DC, trabajan de forma más eficiente a altas revoluciones por minuto RPM. Por ejemplo, la velocidad de un motor típico para extrusion es de 2000 RPM. Sin embargo, esta velocidad no es la apropiada para un tornillo o husillo. Por tal razón los reductores usualmente más utilizados son los que tiene un rango de 10:1 a 20:1, esto da como resultado la velocidad típica de un tornillo o husillo que es de 100 a 200 RPM. Esto al final se traduce en un mejor rendimiento y un incremento del torque.

2.7.1. Características de los motores DC

Constitución de las máquinas de corriente continua DC.

En las máquinas de DC el inductor está en el estator, que es de polos salientes, y el inducido está en el rotor.

Ambos devanados se conectan a tensiones continuas, pero el devanado inducido recibe su tensión a través de un colector de delgas, por lo que la corriente que circula por él es alterna (aunque no sinusoidal).

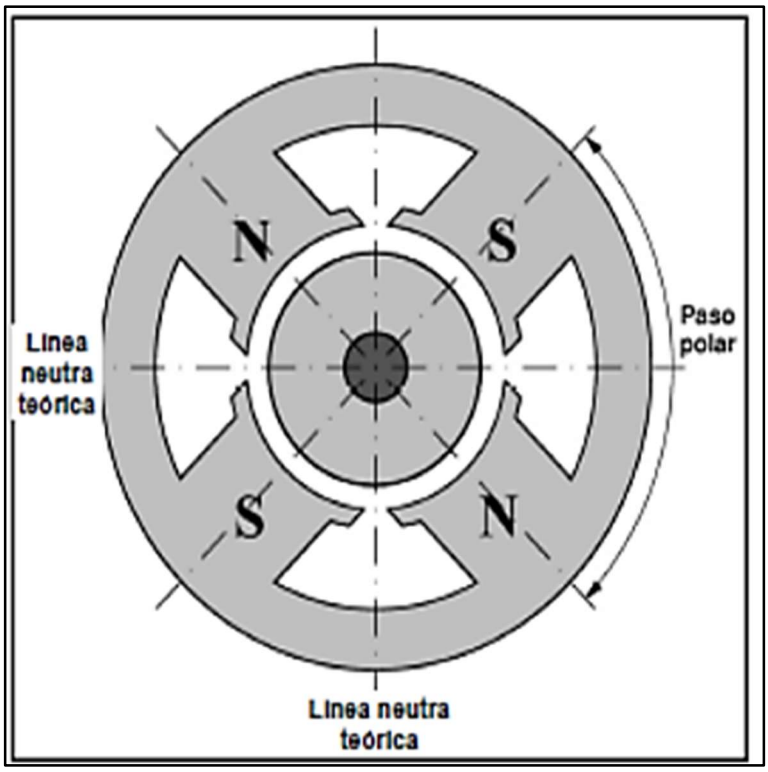
En estas máquinas el núcleo magnético del rotor se construye apilando chapas magnéticas; pues al girar se ve sometido a un campo magnético variable y, en consecuencia, tiene pérdidas magnéticas. El circuito magnético del estator puede ser de hierro macizo, pues está sometido a un campo magnético constante por lo que carece de pérdidas magnéticas. Aun así, a veces los polos se construyen apilando chapas magnéticas.

Cuando actúa como motor la interacción del campo magnético inductor con las corrientes alternas que circulan por el devanado del rotor produce el giro de éste.

2.7.2. Constitución básica de una máquina DC

El inductor es de polos salientes y está en el estator. El inducido está en el rotor y su devanado se aloja en ranuras. El inducido se alimenta a través de un colector de delgas que no aparece en la figura 21. Una línea neutra (L.N.) es una recta que une los puntos donde el campo magnético se anula. Hay tantas líneas neutras como pares de polos. Una línea neutra teórica es una L.N. cuando solo existe el campo magnético inductor y pasa justo por el centro de los espacios interpolares.

Figura 21. **Constucción básica de máquina DC**



Fuente: Rodriguez M. (2017). *Constitución básica de una máquina de DC*. Máquinas de corriente continua, Universidad de Cantabria España, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.

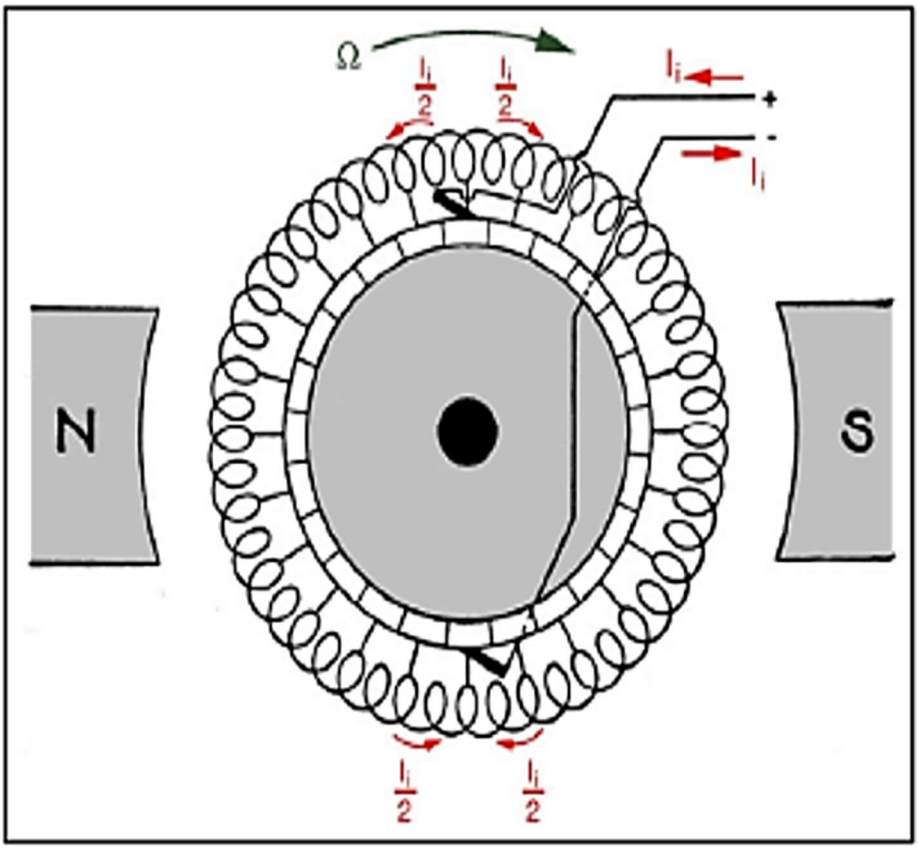
2.7.2.1. Esquema básico de funcionamiento

El inducido es un devanado cerrado (en la figura se trata de un devanado en anillo).

Las escobillas y el colector de delgas hacen que el inducido se divida en un número par de *ramas en paralelo* idénticas.

En la figura 22 las dos escobillas dividen el inducido en dos ramas en paralelo.

Figura 22. **Constitución de una maquina DC**



Fuente: Rodriguez M. (2017). *Constitución básica de una máquina de DC*. Máquinas de corriente continua, Universidad de Cantabria España, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.

2.7.2.2. Principio de funcionamiento de un motor de corriente continua

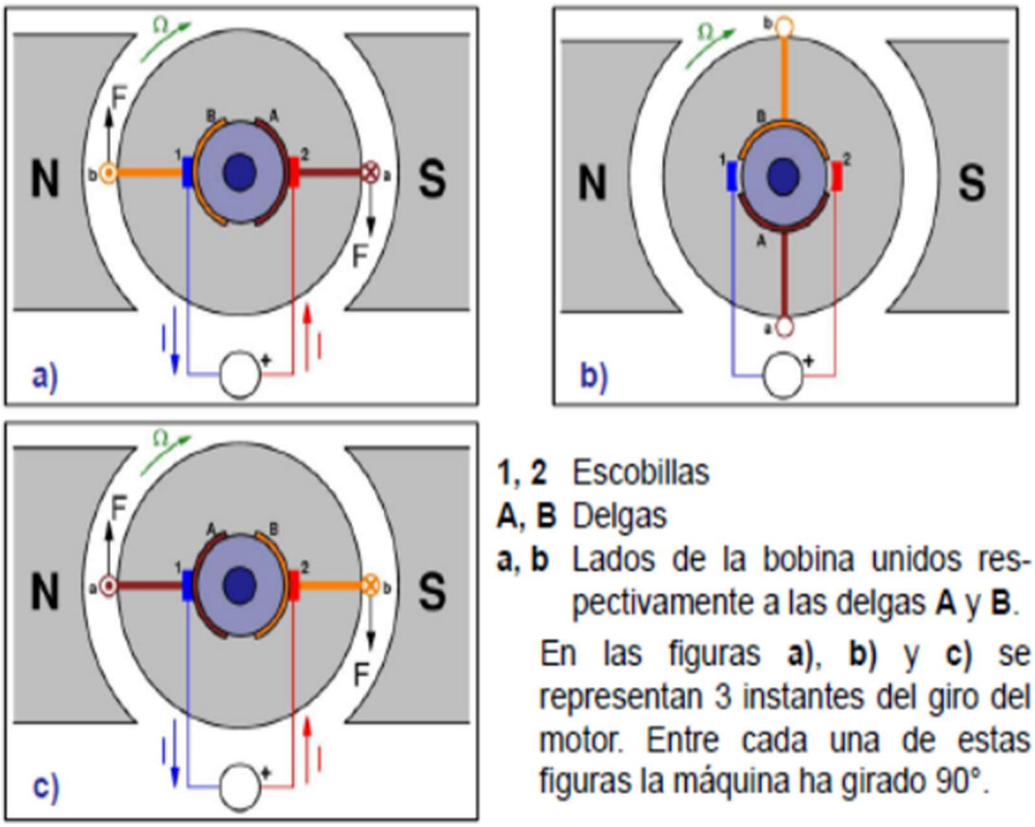
Cuando la máquina actúa como motor da lugar en el eje a un par motor; es decir, un par que actúa en el mismo sentido que la velocidad de giro (luego produce energía mecánica), y en bornes del inducido a una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.), que se opone a la circulación de la corriente que le impone la red eléctrica externa (luego, absorbe energía eléctrica de la red).

Para que la máquina pueda funcionar como motor las corrientes de los conductores del inducido que están frente a un polo inductor dado deben ser siempre del mismo sentido.

Esto obliga a que la corriente de un conductor se invierta cuando el movimiento del rotor lo hace pasar de estar frente a un polo a estar frente a otro de polaridad contraria. Esto se consigue mediante el colector de delgas.

Por lo tanto, el colector de delgas hace que la corriente continua que le llega del exterior se convierta en una corriente alterna (aunque no sinusoidal) en el bobinado inducido.

Figura 23. **Funcionamiento motor DC**



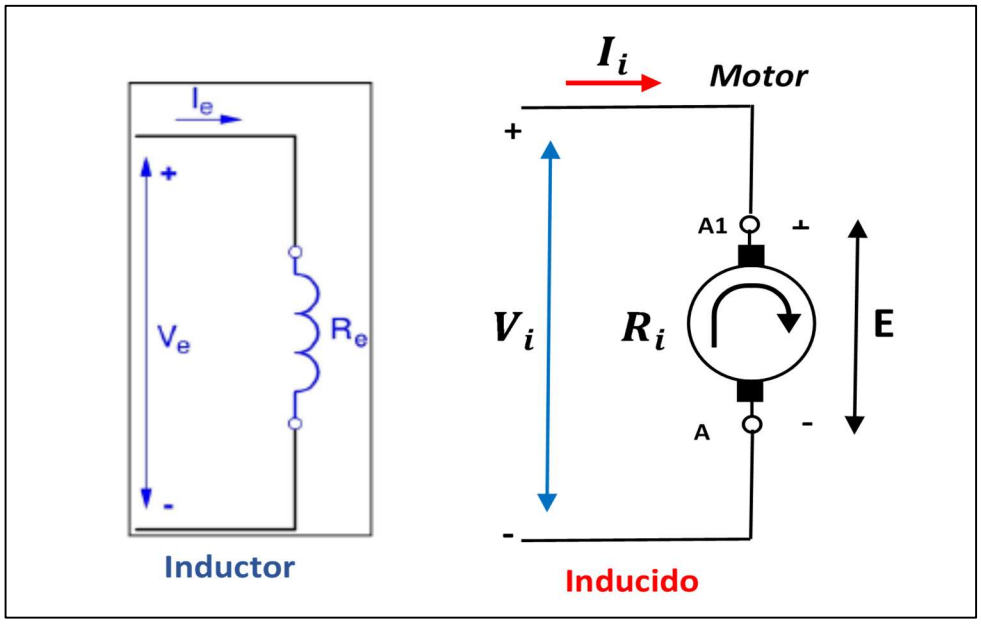
Fuente: Rodriguez M. (2017). *Principio de funcionamiento de un motor DC*. [Figura]. Máquinas de corriente continua, Universidad de Cantabria España, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.

2.7.2.3. Inductor e inducido de un motor DC

Entre los bornes A1 y A2 del inducido se incluyen también los bobinados auxiliares (de compensación y de conmutación).

En ocasiones se colocan reóstatos en el inductor y/o en el inducido que no se han representado en estas figuras y cuya resistencia se incluye dentro de Re y de Ri.

Figura 24. **Inductor e inducido motor DC**



Fuente: Rodriguez M. (2017). *Inductor e Inducido de un motor DC*. Máquinas de corriente continua, Universidad de Cantabria España, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética.

2.7.3. Motores DC

Un motor de corriente continua está conectado a una red de donde consume energía eléctrica para transformarla en energía mecánica, la cual origina un par motor que lo hace girar.

La ecuación eléctrica de su devanado inducido es. (ver figura 24).

$$V_i = E + R_i I_i + V_{esc} \approx E + R_i I_i$$

Vi: tensión de alimentación del circuito inducido (de resistencia Ri).

Ii: corriente del devanado inducido.

Ve: tensión de alimentación del circuito inductor (de resistencia Re).

Ie: corriente del devanado inductor o de excitación.

Re: resistencia total del circuito inductor, el cual está formado por: devanado inductor + reóstato de excitación o de regulación del campo (si lo hay) (ver el anexo A).

Ri: resistencia total del circuito del inducido, el cual está formado por: devanado inducido + devanados auxiliares + devanado de excitación serie (si lo hay) + reóstato (si lo hay) (ver el anexo A).

E: fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en el devanado inducido.

Vesc: caída de tensión en un par de escobillas (Vesc ≈ 2 V si Ii ≠ 0).

- Potencias de entrada y salida

En un motor la potencia de entrada P1 es la potencia que la red eléctrica (o las dos redes eléctricas que alimentan, respectivamente, al inductor y al inducido del motor cuando la excitación es independiente) le suministra y la potencia de salida P2 es la potencia mecánica que el motor ejerce sobre el eje:

$$P_1 = V_i \cdot I_i + V_e \cdot I_e$$

Si la excitación no es independiente:

$$P_1 = V * I$$

P_i es la *potencia del inducido*, es decir, la potencia eléctrica absorbida por el inducido del motor:

$$P_i = V_i * I_i$$

- Otras potencias

Las *pérdidas en el hierro* P_{Fe} solo se producen en el rotor, ya que el giro hace que su núcleo magnético se vea sometido a un campo magnético variable. En régimen permanente el estator está sometido a un campo magnético constante y no tiene pérdidas en el hierro.

Pérdidas en las escobillas:

$$P_{esc} = V_{esc}\, I_i$$

Pérdidas del cobre del inducido:

$$P_{Cui} = R_i\, {I_i}^2$$

Pérdidas en el inductor:

$$P_{Cui} = V_e\, I_e = R_i\, {I_i}^2$$

La potencia electromagnética o potencia interna $\mathrm{P_{em}}$ (que también se denomina $\mathrm{P_a}$) del motor es la potencia que se transforma de eléctrica en mecánica:

$$P_{em} = E \cdot I_i = M \cdot \Omega$$

- Características de servicio

Característica de velocidad: n = f(Ii) $n = f\ (I_i)$

Muestra la relación entre la velocidad n y la corriente del inducido I_i.

Característica de par: $M = f\ (I_i)$

Muestra la relación entre el par M y la corriente del inducido I_i.

- Característica Mecánica

Esta es la característica más importante para el análisis de motores. Aquí se usará en la forma n = f(M).

La característica mecánica para los valores asignados de V, Re y Ri (sin reóstatos en el inductor ni en el inducido) se denomina característica natural de la máquina.

A veces se muestra en una misma gráfica una familia de características mecánicas, cada una de las cuáles corresponde a diferentes valores de Vi o de Ri o de Re.

La relación entre n y M es así:

$$n = \frac{V_i - V_{esc} - R_i I_i}{K_E \cdot \Phi} \approx \frac{V_i - R_i I_i}{K_E \cdot \Phi}$$

$$M = K_M \cdot \Phi \cdot I_i \rightarrow I_i = \frac{M}{K_{M \cdot \Phi}}$$

$$donde\ n = \frac{V_i}{K_{E \cdot \Phi}} - \frac{R_i}{K_E \cdot K_M \cdot \Phi^2}$$

Si el flujo ϕ se anulase, teóricamente $n = \infty \Rightarrow$ la máquina se embala (alcanza una velocidad muy elevada).

2.7.4. Diferencias con los motores AC

Es importante comprender que los motores de AC y DC cumplen la misma función de conversión de energía eléctrica en energía mecánica, están alimentados, construidos y controlador de manera diferente.

La diferencia más básica es la fuente de energía. Los motores de AC funcionan con corriente alterna CA mientras que los motores de DC funcionan con corriente continua CC, como baterías, fuentes de alimentación de CC o un convertidor AC a DC. (Electricaplicada.com, 2021)

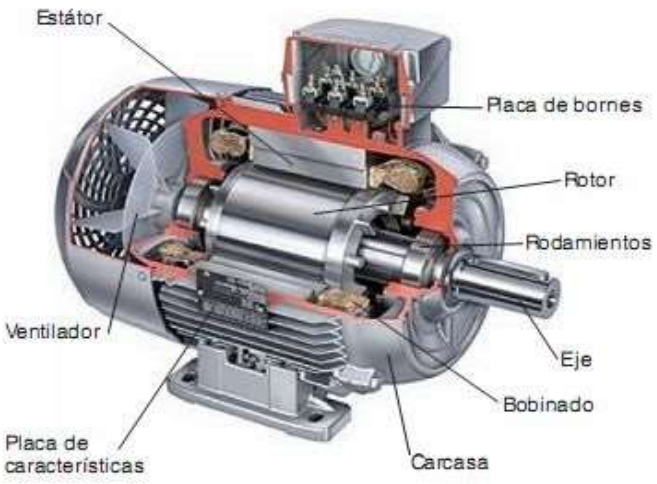
Los motores de DC están construidos con escobillas y un conmutador, que se suman al mantenimiento, limitan la velocidad y generalmente reducen la esperanza de vida de los motores DC.

Una de las diferencias de los motores de inducción de AC, es que no usan cepillos, son muy resistentes y tienen una larga expectativa de vida. La diferencia básica final es el control de velocidad. La velocidad de un motor de DC se controla variando la corriente del devanado del inducido, mientras que la velocidad de un motor de AC se controla variando la frecuencia, lo que comúnmente se hace con un control de frecuencia ajustable (variador de velocidad)

Realizada esta explicación sobre las diferencias entre motores de AC y de DC, se abordará a continuación una explicación sobre el motor de AC, ya que en el apartado anterior se ve el motor de DC.

En la figura 25, se aprecian las partes más importantes de un motor de AC.

Figura 25. **Partes de un motor AC**



Fuente: Matienzo B. (2011). *Partes fundamentales de un motor eléctrico*. Consultado el 1 de diciembre de 2019. Recuperado de https://sites.google.com/site/279motoreselectricos/partes-fundamentales-de-un-motor-electrico.

2.7.5. Motores de corriente alterna CA

El motor de corriente alterna es una maquina capaz de convertir energía eléctrica en energía mecánica rotacional para que esta sea aprovechada de forma eficiente. Se realiza una breve descripción del motor trifásico con rotor jaula de ardilla, que es probablemente el más sencillo y robusto de los motores eléctricos. El rotor está constituido por varias barras conductoras dispuesta paralelamente al eje del motor y por anillos conductores en los extremos.

Todo el conjunto es similar a una jaula de ardilla y por eso se le denomina también motor de jaula de ardilla. El estator está constituido de un conjunto de bobinas, cuando la corriente la atraviesa, se forma un campo magnético rotatorio en las proximidades del estator. Esto induce una corriente en el rotor, que crea su propio campo magnético. La interacción entre ambos campos produce un par en el rotor. Se debe aclarar en este punto que no existe conexión eléctrica directa entre estator y rotor. Se pueden agregar también que la corriente alterna de alimentación determina la velocidad a la cual gira el campo magnético del estator.

2.7.5.1. Estructura del motor CA

El estator es la parte fija del motor y se compone de una carcasa y un paquete de chapas con ranuras, en el que se encuentra el arrollamiento de corriente trifásica. Este se compone de tres bobinas fijadas cada una de ellas 120°. Los extremos del arrollamiento son conducidos al tablero de bornes situado en la caja de conexiones.

En estas ranuras se introducen barras conductoras de aluminio o cobre o se inyectan barras moldeadas a presión de aluminio, que están conectadas a las contrahuellas mediante anillos de cortocircuito. Las barras y los anillos de cortocircuito forman una jaula y producen el arrollamiento del rotor. La disposición inclinada de las barras produce un movimiento uniforme.

2.7.5.2. Velocidad en el campo giratorio

Cuando se conectan los arrollamientos del motor a la red de corriente trifásica, se genera un campo giratorio en el estator que gira con la velocidad sincrónica o con la velocidad en campo giratorio n_d:

$$n_d = \frac{f_i}{p}$$

$$f_i = frecuencia\ de\ red$$

$$p = numero\ de\ pares\ de\ polos$$

2.7.5.3. Par y deslizamiento

El deslizamiento s se define como la diferencia entre la velocidad en el campo giratorio n_d y la velocidad del rotor n . De este modo se generan valores de deslizamiento de entre $s = 0$ (caso teórico en que la velocidad del motor coincide con la velocidad sincrónica) y $s = 1$ (parada del motor).

$$s = \frac{n_d - n}{n_d}$$

La fuerza que actúa sobre el rotor es proporcional a la corriente de inducido I_2 según la del del conductor inundando en un campo magnético. Por lo tanto, se puede afirmar que.

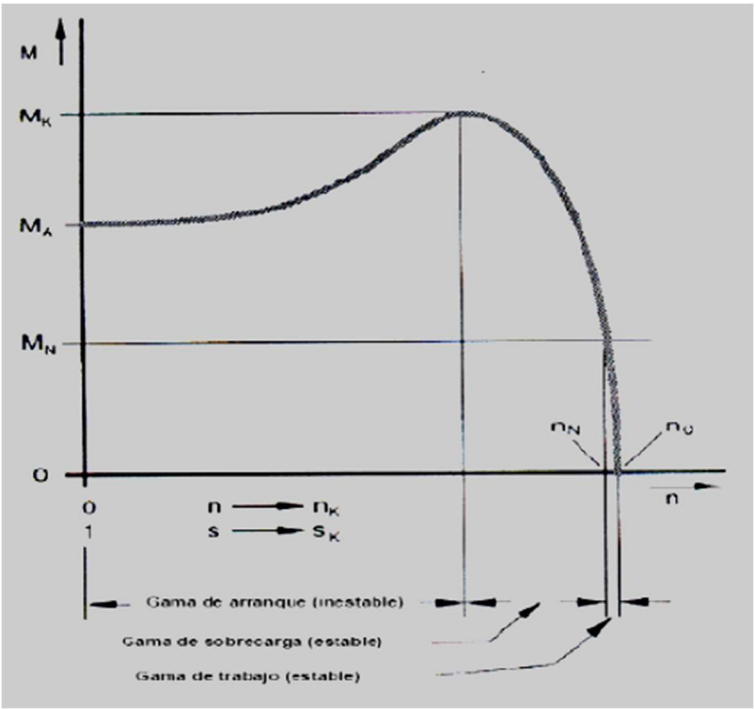
$$M \cong \theta \cdot I_2$$

$$\theta = flujo\ magnetico\ en\ la\ division\ del\ aire\ del\ motor$$

La corriente de inducido aumenta a medida que se incrementa el deslizamiento (velocidad relativa estandarizada) y el par M (par = fuerza * brazo de fuerza) interno que actúa sobre el rotor también aumenta.

Puntos característicos de la curva de régimen de un motor asíncrono trifásico con rotor jaula de ardilla.

Figura 26. **Curva de régimen motor asíncrono**



Fuente: Gutierrez M. (2017). *Motores de corriente alterna*. Consultado el 1 de diciembre de 2019. Recuperado de implementación de variadores de frecuencia en máquinas extrusoras.

- Punto de arranque

Para ello se debe detener el rotor ($n = 0$). Conforme a la definición del desplazamiento,

$$s = \frac{n_d - n}{n_d}$$

Se encuentra en el punto de arranque del desplazamiento $s = 1$. Actúa un par de arranque M_A.

- Punto de marcha en vacío

Si el rotor gira a la misma velocidad que el campo del estator siendo $n_d = n$, la velocidad relativa y el deslizamiento son cero. En consecuencia, no hay ninguna inducción ni se genera ningún par. Por lo tanto $M = 0$.

- Punto de régimen nominal

Las magnitudes más importantes de un motor son el par nominal M_N y la velocidad nominal n_N. Ambas pueden calcularse con los datos indicados en la placa de características del motor. La potencia mecánica suministrada por el árbol (potencia nominal según la placa de características) se calcula con la fórmula siguiente:

$$P_N = M_N \cdot 2\pi \cdot n_N$$

El punto de régimen nominal no es un punto especial en la curva característica, sino que normalmente se determina mediante la potencia perdida en régimen constante bajo carga y el exceso de temperatura relacionado con ella. El par nominal no aparece en la placa de características y, por lo tanto, debe calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$M_N = \frac{P_N}{2\pi \cdot n_N}$$

$$P_N = potencia\ nominal\ indicada\ en\ vatios\ (W) o\ kW/1000$$

$$n_N = velocidad\ nominal\ indicada\ en\ (s-1)\ o\ \frac{min^{-1}}{60}$$

- Punto de inversión

Otra magnitud importante es el par de inversión M_K. Es a la vez el par máximo posible que puede generarse en los motores asincrónicos trifásicos. Si se reduce la carga, también se reducirán el ángulo de carga y el deslizamiento ($S < S_K$), pero la velocidad aumentará ($n < n_K$). De este modo se alcanza la gama útil estable del motor asíncrono trifásico con rotor jaula de ardilla y se debe tener en cuenta que un régimen dentro de la gama de sobrecarga ($n_n > n > n_K$) o ($s_n > s > s_K$) sólo está permitido por poco tiempo, por. ejemplo., durante una fase de aceleración.

En los motores estándar, se pueden afirmar que el par de inversión es.

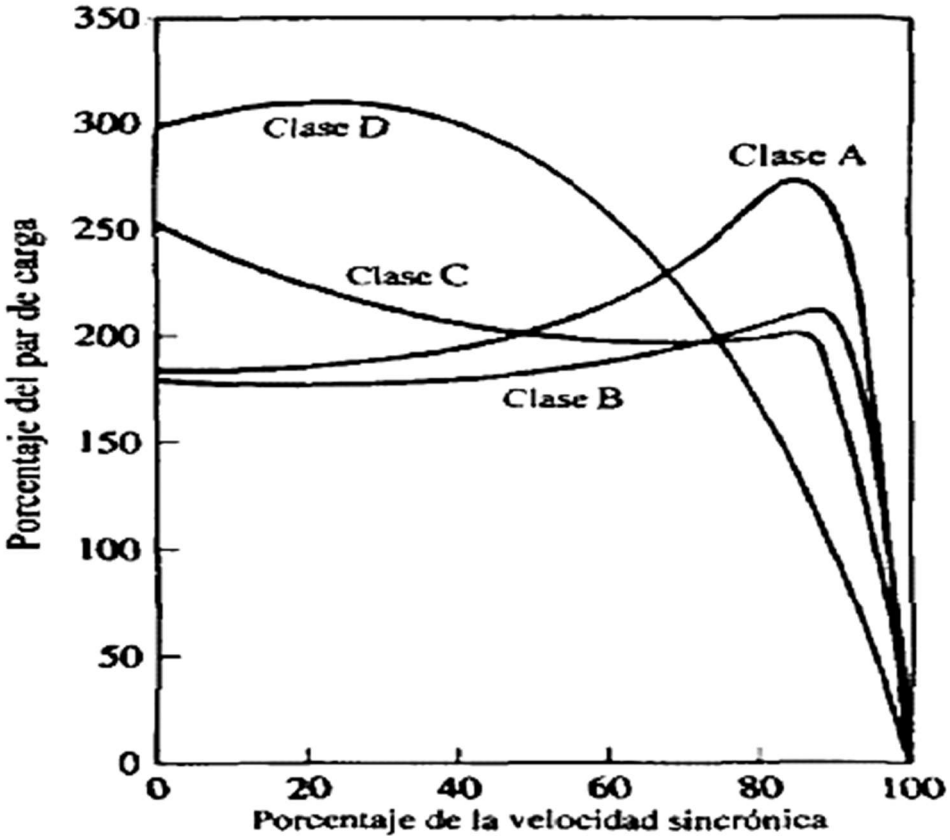
$$M_K = (2.3) \cdot M_N$$

El deslizamiento de desenganche K_s se encuentra entre el 5 y el 10%, y depende básicamente del tamaño del motor.

2.7.6. Clases de diseño de los motores de inducción

La National Electric Manufacturers Association (NEMA) y la International Electrotechnical Comision (IEC), desarrollaron un sistema de identificación mediante letras para los motores comerciales, según las curvas características par-velocidad para cada diseño. A continuación, se mencionan de una manera breve y sencilla.

Figura 27. **Clases de diseño motores de inducción**



Fuente: Gutierrez M. (2017*). Motores de corriente alterna*.

2.7.6.1. Diseño clase A

Es un motor de jaula de ardilla para usarse a velocidad constante. Sus principales características son:

- Buena capacidad de disipación de calor.
- Alta resistencia y baja reactancia al arranque.
- El par máximo está entre 200 % y 300 % del par de plena carga y ocurre a un bajo deslizamiento.

- Aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal.
- Presenta la mejor regulación de velocidad, entre el 2 y 4%.
- Desafortunadamente su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal.
- Han sido reemplazados por los motores de diseño clase B en los últimos años.
- Se utilizan en ventiladores, sopladores, bombas, tornos, entre otras.

2.7.6.2. Diseño clase B

Se les llama motores de propósito general y a este tipo pertenecen la mayoría de los motores con rotor de jaula de ardilla. A continuación, se resumen sus características:

- Par de arranque normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento.
- Produce casi el mismo par de arranque que el diseño anterior.
- El par máximo es mayor o igual al 200 % el par de carga nominal.
    - Deslizamiento bajo (menor del 5 %).
- Se prefieren sobre los diseños de clase A por requerir poca corriente de arranque.

2.7.6.3. Diseño clase C

- Alto par de arranque (entre 2 y 2.5 veces el nominal) con bajas corrientes de arranque (de 3.5 a 5 veces la nominal).
    - Son construidos con un rotor de doble jaula (más costosos).
    - Bajo deslizamiento (menos del 5 %) a plena carga.

- Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente.
- Cuando se emplea con cargas pesadas, se limita la disipación Térmica del motor, ya que la mayor parte de la corriente se Concentra en el devanado superior.
- Tiende a sobrecalentarse con arranques frecuentes.
- Se utilizan para cargas con alto par de arranque, Compresor y transportador.

2.7.6.4. Diseño clase D

- También conocidos como de alto par y alta resistencia.
- Alto par de arranque (275% o más del nominal) y baja corriente de arranque.
- Alto deslizamiento a plena carga.
- La alta resistencia del rotor desplaza el par máximo hacia una velocidad muy baja.
- Diseñado para servicio pesado de arranque, en especial grandes volantes utilizados en troqueladoras o cortadoras.
- También existen las clases E y F, llamados motores de inducción de arranque suave, pero obsoletos hoy en día.

3. MARCO METODOLÓGICO

La elaboración de esta investigación orientada a estudiar el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa" aplicado a la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico; por tanto, metodológicamente se realizó mediante un estudio experimental sustentado en una investigación explicativa de carácter descriptivo.

3.1. Diseño y tipo de investigación

El tipo de investigación en el contexto metodológico, determina la dirección de cómo será aplicada el proyecto de investigación para que pueda llevarse a cabo, donde establecen cuatro tipo de investigación, basándose en la estrategia de investigación que se emplea, ya que *"el diseño, los datos que se recolectan, la manera de obtenerlos, el muestreo y otros componentes del proceso de investigación son distintos en estudios exploratorios, descriptivos, correlaciónales y explicativos"* (Hernández-Sampieri, R., Fernández, C . y Baptista, 2013, p. 114).

El presente trabajo grado, es una investigación explicativa, que *"pretende establecer las causas de los eventos, sucesos o fenómenos que se estudian"* (Hernández-Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, 2013, p. 83). Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar el porqué de los hechos físicos o sociales y en qué condiciones se manifiestan o por qué se relacionan dos o más variables. En efecto el estudio se buscó explicar la hipótesis a fin de determinar el impacto del reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad

de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

Por otra parte, el diseño de la presente investigación se sustentó con un estudio de campo, experimental, sustentado en un documental de carácter descriptivo, mediante la búsqueda de información relacionada al estudio para el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

En cuanto a la propuesta presentada, es un estudio de campo para un caso específico ya que se ejecuta la propuesta en la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plásticos.

Según el autor Fidias (2012), define: “La investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de todos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variables algunas, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes” (Fidias, 2012, p. 26).

> Según Fidias (2012), la investigación explicativa, se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos. (p.26).

La investigación documental, aplica como Técnica la recopilación de información a través de la lectura de la información documental y bibliográficos, centros de documentación e información, entre otros. Se deben seleccionar y analizar aquellos escritos que contienen datos de interés relacionados con el estudio. (Donis, 2014)

Adicionalmente, esta investigación es un estudio con diseño descriptivo, realizando un análisis de las variables que afectan el estudio.

En definitiva, se trata de una investigación explicativa, donde se realiza un estudio experimental, sustentado en un estudio documental de carácter descriptivo.

3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación se corresponde con un estudio de campo ya que se aplicó a la empresa Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico.

Adicionalmente se sustentó en una investigación documental, mediante la búsqueda de información relacionada al estudio para el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa. La investigación documental:

Aplica como Técnica la recopilación de información a través de la lectura de la información documental y bibliográficos, centros de documentación e información, entre otros. Se deben seleccionar y analizar aquellos escritos que contienen datos de interés relacionados con el estudio. (Donis, 2014)

Los instrumentos de investigación documental son todas aquellas herramientas utilizadas para recolectar la información en esta clase de estudios. Por su parte, la investigación documental es un tipo de indagación basado en la revisión de documentos escritos y no escritos que guarden relación con el propósito del estudio. La clasificación o tipos de instrumentos pueden ser: Ficha de Contenido, Ficha bibliográfica, Fichas hemerográficas, Fichero y Registro de Página Electrónica. (Castillo, 2018)

Adicionalmente, la investigación es un estudio con diseño descriptivo, realizando un análisis de las variables que afectan las carteras de crédito indexados al tipo de cambio.

3.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis se refiere a los participantes, objetos, sucesos o comunidades de estudio, en donde se centra la atención de la investigación, y se encuentra establecida en el planteamiento del problema y el alcance del estudio (Hernández-Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, 2013). De esta manera, la unidad de análisis planteada es el estudio el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa, siendo la unidad de análisis el motor y variador de velocidades de AC.

3.4. Fuente de la información

La fuente de la información que será utilizada en el estudio, fueron la siguiente:

- Fase de Inicio: fichas Bibliográficas, Ficha Técnica con información de la máquina, manuales y diagramas originales del fabricante.

- Fase de Planificación: planos eléctricos de la máquina, Hoja de Cálculo, Ficha de Control donde están todos los componentes eléctricos.

- Fase de Ejecución: listado de chequeo.

- Fase de Cierre: listado de chequeo.

3.5. Metodología

La metodología de la investigación se sustentó en cuatro (4) fases de la investigación de este Proyecto de investigación:

- Fase.inicio: para iniciar el ejercicio profesional supervisado, el reconocimiento de las actividades que se realizaban fue importante durante el primer mes, para determinar cuáles son los principales circuitos de potencia y control los cuales se debían de modificar e integrar a las nuevas tecnologías. Se buscó la información de la máquina, como manuales y diagramas proporcionados por el fabricante.

- Fase.planificación: a continuación, se realizó también la verificación y levantado de planos eléctricos en máquina para poder determinar con seguridad toda la circuitería que se necesitó modificar para la integración de los nuevos componentes.

- Seguidamente se realizaron los cálculos para poder determinar la potencia y características del nuevo motor y variador de velocidad, tomando en

cuenta en este paso todas las protecciones, cables y dispositivos secundarios que sirvieron para el control del motor y variador de velocidad. Siguiendo con el cálculo y fabricación del armario de control donde están todos los componentes eléctricos.

- Fase. ejecución: una vez aprobado el proyecto, se procede a implantar el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

- Fase.cierre: en la parte final del ejercicio profesional supervisado se procedió a realizar pruebas y evaluar el funcionamiento y manejo de la maquinaria y la respuesta del motor y variador en los distintos regímenes de trabajo, evaluando aquí también todas las señales de proceso.

3.6. Variables de la investigación

El concepto de variable se entiende como “cualquier característica o cualidad de la realidad que puede tener diferentes valores; por tanto, pueden variar su valor considerándose que puede tener un valor fijo” (Guerrero, 2013, p. 34).

“La variable independiente es aquella característica de la causa del fenómeno estudiado; es decir, son los elementos o factores que explican un fenómeno científico” (Guerrero, 2013, p. 34). “La variable independiente, es la causa que responde al fenómeno a investigar” (Hernandez & Hernández, 2014, p. 75)

En este sentido, a continuación, se definen las variables de la investigación:

aplicado a la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico

- Variable dependiente: línea de extrusión monocapa

- Variable independiente: motor, variador de velocidad de dc, variador de velocidades de ac

3.7. Operacionalización de las variables

La Conceptualización y Operacionalización de las variables, se diseñó en función al cumplimiento de los objetivos de estudio.

Tabla I. **Operacionalización de las variables**

Objetivo	Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional
Estudiar el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa	*Variador de velocidad de DC*	El variador de velocidad DC es un conjunto, el cual está diseñado para el control separado de excitación independiente o de imán permanente desde una fuente única de corriente alterna. La velocidad de un motor de corriente continua con excitación independiente puede conseguirse a través de la variación de la tensión de inducido por eso la velocidad del motor es directamente proporcional a la tensión del inducido. (García Fabian & García Ebaristo, 1999)	Los motores de bobina DC están construidos con escobillas y un conmutador, que se suman al mantenimiento, limitan la velocidad y generalmente reducen la esperanza de vida de los motores de DC cepillados.
	Variador de velocidad de AC	Se denomina Corriente alterna (CA ó AC en inglés) a la corriente eléctrica que cambia repetidamente de polaridad. esto es, su voltaje instantáneo va cambiando en el tiempo desde 0 a un máximo positivo, vuelve a cero y continúa hasta otro máximo negativo y así sucesivamente, la magnitud y el sentido varían cíclicamente. (Alejandro.com, 2021)	Los motores de inducción de AC no usan cepillos; son muy resistentes y tienen una larga expectativa de vida. La velocidad de un motor de AC se controla variando la frecuencia, lo que comúnmente se hace con un control de frecuencia.

Continuación tabla I.

Dimensión	Instrumento de Medición Técnica	Fuente de Información
Ingeniería Eléctrica	-Ficha Bibliográfica -Ficha Técnica con información de la máquina - Manuales Diagramas originales del fabricante.	-Central de Empaques, S.A. -Manuales del motor de 180 KW del Fabricante
Ingeniería Eléctrica	-Ficha Bibliográfica -Planos eléctricos de la máquina. - Hoja de Cálculo -Ficha de Control donde están todos los componentes eléctricos.	Central de Empaques, S.A.

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Word.

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección del proyecto de investigación se presentan los resultados del estudio y la propuesta dirigida a realizar un Estudiar el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa; la cual está estructurada un estudio explicativo de carácter descriptivo.

4.1. Actualización de tecnología para la propulsión del extrusor

Con la finalidad de actualización de tecnología para la propulsión del extrusor, de la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. para la fabricación de empaques para alimentos, considerando que es una empresa que ha realizado importantes inversiones en equipos para producir empaques para alimentos de calidad.

Para la producción de empaques flexibles para alimentos tiene en producción 5 líneas de extrusión, 2 monocapa, 2 tricapa y una de 9 capas destinada para empaques especializados.

En esta investigación se propuso el cambio de extrusión monocapa, ya que ha presentado fallas en una de sus líneas de producción, porque las toneladas de material extruido para impresión se han reducido, disminuyendo con esto la capacidad de producción.

Para determinar el tipo adecuado de motor, protecciones eléctricas, consideraciones de ubicación, diagramas eléctricos, materiales y demás

aspectos que sean importantes en este estudio, se consideraran las siguientes normas.

Norma IEEE 3004.8: esta norma cubre un amplio espectro de esquemas de protección de motores, incluyendo baja y medio tensión C.A., factores a considerar, tipo de protección, aplicaciones con accionamientos de velocidad variable (ASD), protección de motores de C.C. y ubicaciones peligrosas. (Electrical Apparatus Service Association, 2017)

Norma UNE EN-60439.1: Conjunto de aparamenta de baja tensión. Norma que da las consideraciones para el conjunto de aparatos de maniobra, de regulación y control, de medida, incluidos los accesorios de las canalizaciones eléctricas, utilizados en las instalaciones eléctricas, cualquiera que sea su tensión. (Normas De Representación de Esquemas Eléctricos, 2017)

Red Book™— IEEE STD 141™-1993 (R1999), Recommended Practice for the Electric Power Distribution for Industrial Plants. El libro rojo IEEE, establece directrices para el control de motores de AC, y también proporciona información pertinente y prácticas recomendadas para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de energía eléctrica en plantas industriales.

Se presentó una propuesta y se ejecutó, donde se planteó la habilitación de la línea de extrusión fallada, con nuevos dispositivos, orientada a realizar una actualización a la parte motriz del extrusor, lo que permitirá aumentar la cantidad de toneladas de material extruido destinado para impresión y otros empaques como termoencogibles.

En este sentido, se realizó el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

4.1.1. Diferencias entre los motores AC y DC

A fin de comprender la propuesta del reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa, es importante explicar de forma breve las diferencias entre los motores AC y DC.

Como ya se ha visto, los motores AC Y DC (cc) cumplen la misma función de conversión de energía eléctrica en energía mecánica; sin embargo, están alineados, construidos y controlados de manera diferente. La diferencia más básica es la fuente de energía.

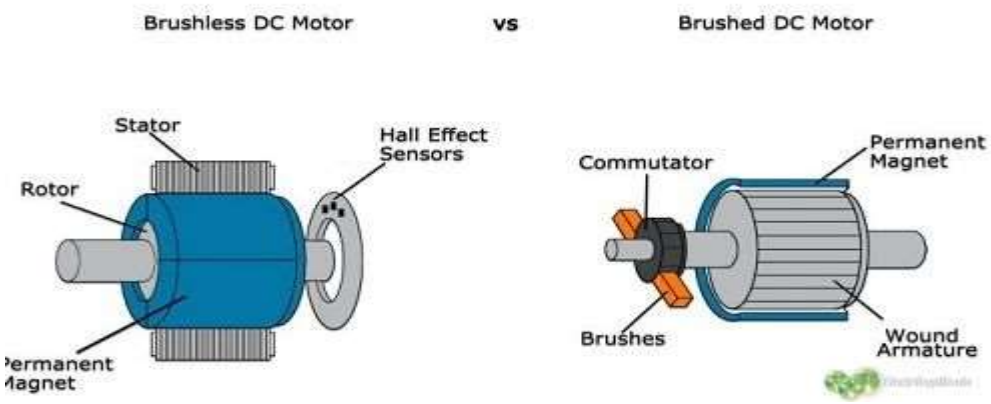
Los motores AC funcionan con corriente alterna (AC) mientras que los motores DC (CC funcionan con corriente continua (CC), como baterías, fuentes de alimentación de CC o un ventilador de AC a DC.

Los motores de bobina DC están construidos con escobillas y un conmutador, que se suman al mantenimiento, limitan la velocidad y generalmente reducen la esperanza de vida de los motores de DC cepillados.

Los motores de inducción de AC no usan cepillos; son muy resistentes y tienen una larga expectativa de vida. La diferencia básica final es el control de velocidad. La velocidad de un motor DC se controla variando la corriente del devanado del inducido, mientras que la velocidad de un motor de AC se controla

variando la frecuencia, lo que comúnmente se hace con un control de frecuencia ajustable (variador de velocidad).

Figura 28. **Diferencia de motores AC y DC**



Fuente: Electricaplicada.com (2021). *Diferencia entre motores de AC (Corriente Alterna y DC (Corriente Directa)*. Consultado el 15 de enero de 2022. Recuperado de https://www.electricaplicada.com/diferencia-motores-ac-dc/_.

4.1.2. Reacondicionamiento, piezas y actualización de equipos

Se le llama así a inspeccionar, desmontar y reemplazar detalladamente los componentes dañados o renovar piezas obsoletas para que el equipo optimice el rendimiento.

4.1.2.1. Sistema que debe de ser sustituido

Los componentes del sistema de propulsión para el husillo de la extrusora monocapa, los cuales sufrieron daños, y se reemplazaran por nueva tecnología son.

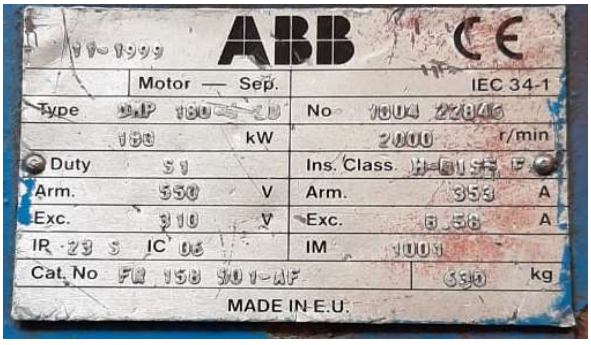
- Motor DC
- Variador de velocidad DC

Motor DC: En la figura 29**,** se aprecia el motor dañado.

Figura 29. **Motor DC ABB de 180 kW, dañado**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 30. **Placa de datos de motor DC ABB de 180 kW**



Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Tabla II. **Datos del motor dañado**

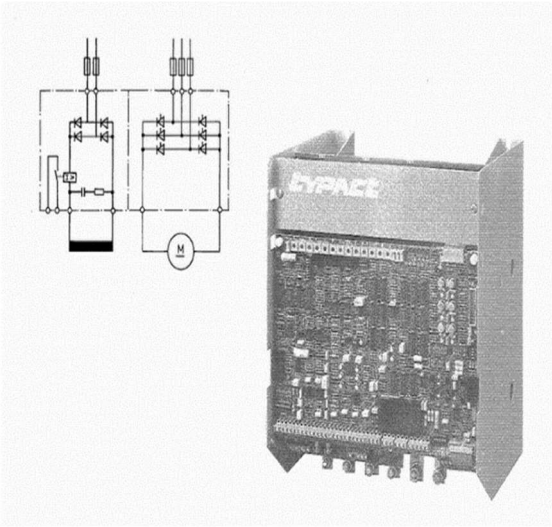
Datos de Motor ABB DMP 180	
Tipo	DMP 180
No.	100422846
Potencia	180 kW
Velocidad máxima	2000 r/min
Clase	H-B1SF F
Voltaje armadura	550 V
Corriente armadura	353 A
Voltaje excitación	310 V
Corriente excitación	8.58 A
IR	23 S
IM	1001
CAT No.	FR 158 50 1-AF
Peso	630 kg
Fabricado	Unión Europea
Torque	800 Nm
Forma de transmisión de potencia	Por 8 correas

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

4.1.2.2. Variador de velocidad

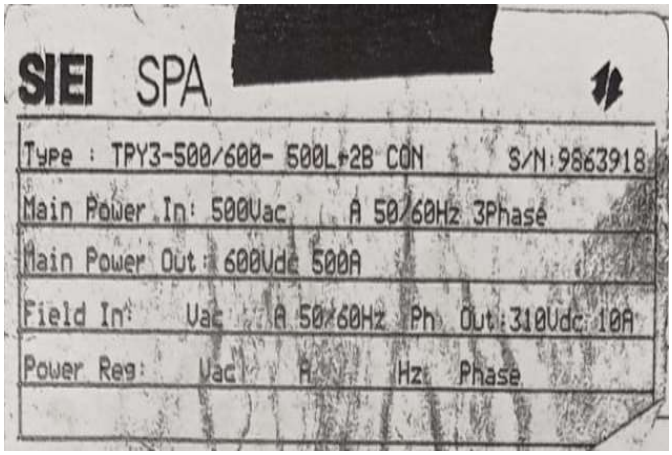
En este caso es un ASD de corriente directa, marca Klockner Moeller TPy3, 450 Amp. En las figuras 31 se aprecia su forma constructiva y en la figura 32 los datos de placa.

Figura 31. **ASD para motor DC**



Fuente: Converter typac. (1986). *Instruction manual*. Consultado febrero 2022. Recuperado de Instruction manual converter typac.

Figura 32. **Placa de datos del ASD dañado**



Converter typac. (1986). *Instruction manual*. [Figura]. Consultado en febrero 2022.Recuperado de Instruction manual converter typac.

4.1.3. Selección de nueva tecnología

Existe varios tipos de modelos de motores actualmente, por eso es necesario realizar una búsqueda adeuada para escoger la tecnología adecuada.

4.1.3.1. Motor de AC250HP

Tal como se explicó anteriormente, los motores de corriente alternan, ofrecen, dado a los avances en el control de frecuencia, mejores ventajas frente a un motor de corriente directa DC, por esta razón ahora ha llegado a ser el más ampliamente utilizado. En la tabla 4, se realizó una comparación entre estos dos tipos de motores de donde se obtuvo que el motor de AC tenía más ventajas sobre el motor DC, por tal razón se elijara el motor de AC para la sustitución.

El motor de AC que se utilizará deberá cumplir con las características de velocidad y torque requeridas por el husillo o tornillo de extrusión.

4.1.3.2. Directrices para la selección de motor

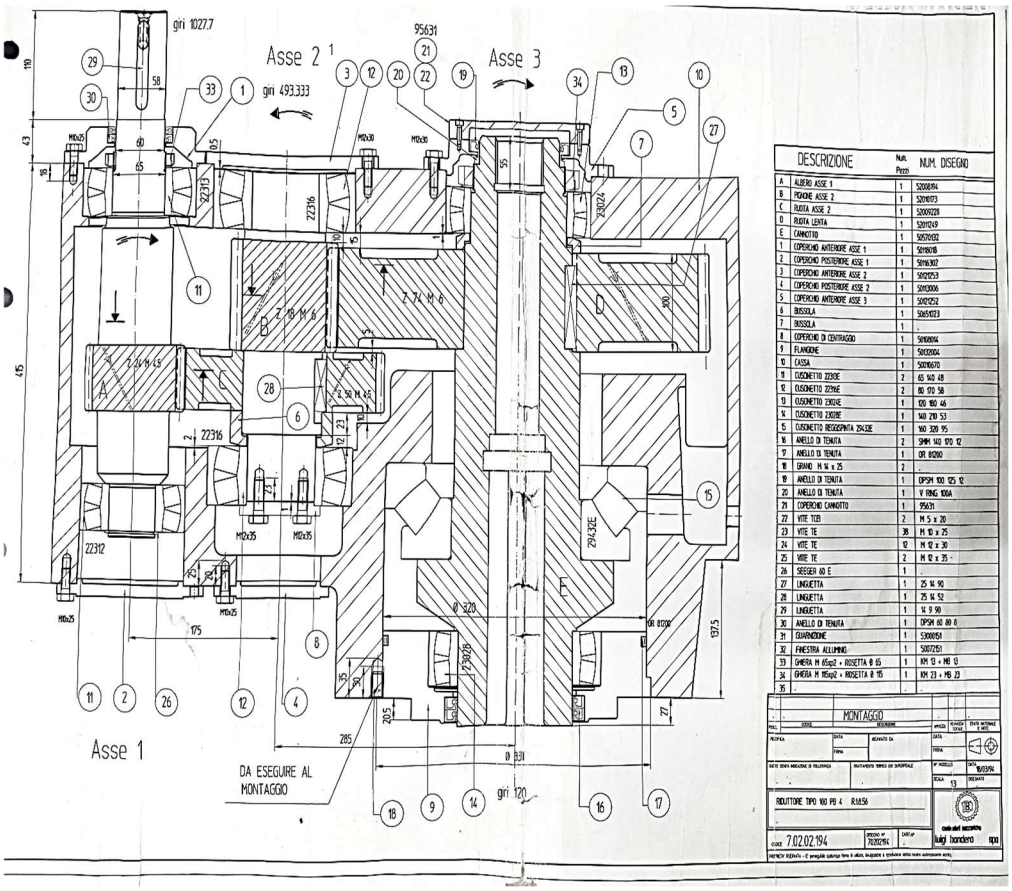
El análisis para la selección de motor se realizará en base a la IEEE STD. 141-1993 (RED BOOK) y NEMA MG 1-2011, la elección de un motor depende de varios factores lo cuales se describen a continuación.

- El suministro de energía eléctrica al cual estará conectado.
- El tipo de cierre de la carcasa.
- El método de arranque con el que va a estar conectado.
- Carga en KW.
- Velocidad.
- Par N-m.

- Grado de protección.

En primera instancia se centró en los incisos **d** al **f,** ya que acá se realizan los cálculos de carga en kW, velocidad y Par N-m en base a los datos del reductor figura 33 y al diagrama cinemático figura 34. De donde se obtienen los siguientes datos: Velocidad de entrada 1,028 RPM (ver Asse 1, figura 33), Velocidad de salida 120 RPM (ver Asse 3, figura 33), Par requerido por el reductor 14,200 N-m (ver Asse 1, figura 33).

Figura 33. **Caja reductora extrusora bandera**



Bandera L. (2000*). Elementos constructivos*.

Aunque de la placa de datos del motor antiguo y del esquema cinemático figura 34, se obtiene la potencia del motor en kW, se debe de realizar los cálculos para determinar la velocidad y par adecuados del nuevo motor.

El análisis de la potencia eléctrica se termina mediante la siguiente expresión.

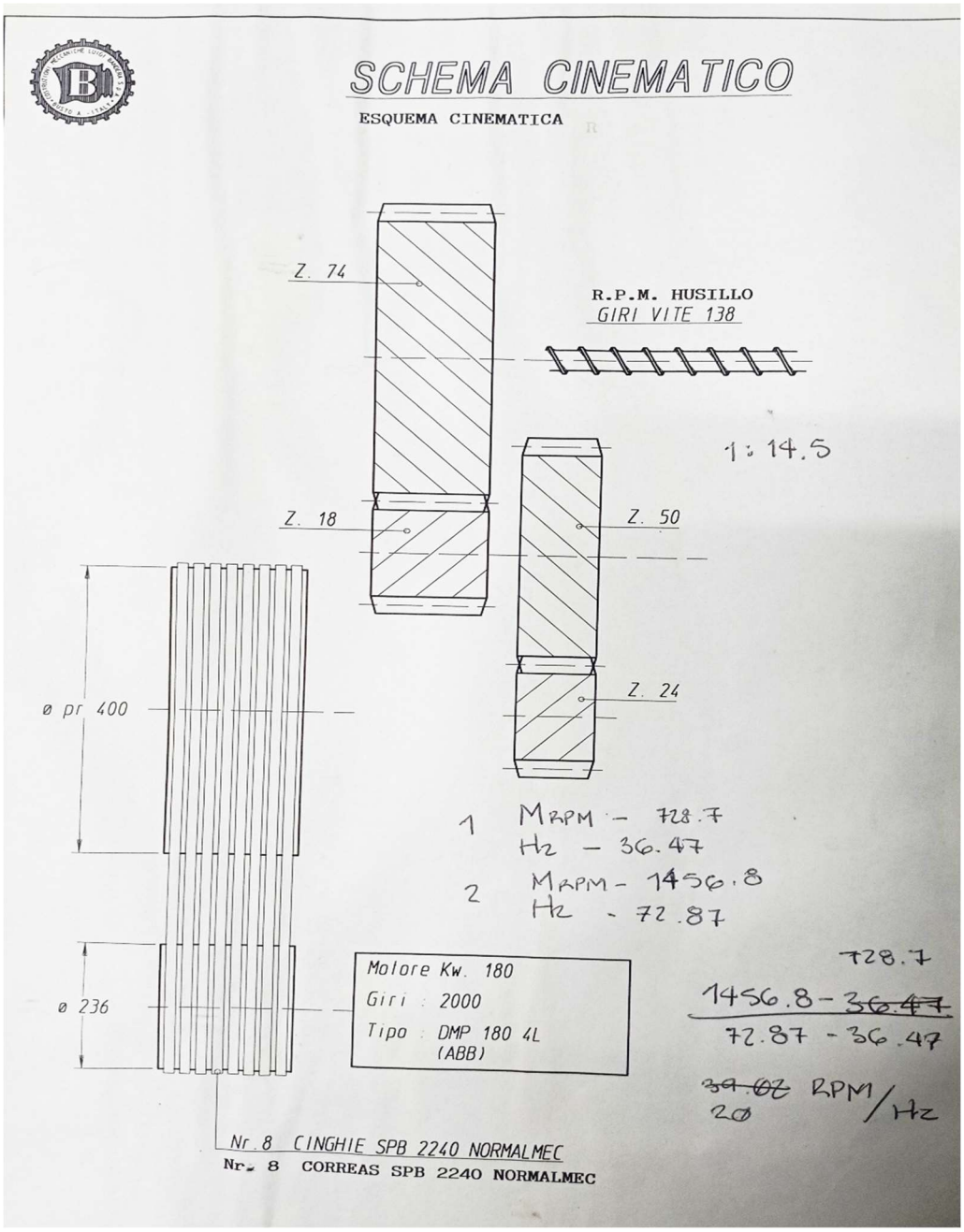
$$P = \sqrt[3]{3} \cdot V \cdot I \cdot Cos\ \varphi$$

Donde.

P = Potencia en kW
I = corriente en amperios (Amp).
V = Voltaje o tensión en voltios.

$Cos\ \varphi$ = Factor de potencia.

Figura 34. **Esquema cinemático, extrusor monocapa**



Bandera L. (2000). *Elementos constructivos*. Consultado febrero de 2022.

El análisis de la potencia mecánica en el eje del motor eléctrico se determina mediante la siguiente expresión.

$$P = \frac{T \cdot N \cdot 0.746}{K}$$

Donde.

P = Potencia en kW
T = Torque en N-m
N = Velocidad en RPM (en la entrada o salida del reductor)
K (es constante) = 7,124 si T está en N-m; y 5,250 si T está en pie-libra)
0.746 kW = 1 HP (Horse Power)

Según la caja reductora se tiene un torque de 14,200 N-m y una velocidad de salida de 120 RPM.

$$P = \frac{(14{,}200\ N \cdot m)(120\ RPM)(0.746)}{7{,}124}$$

$$P = 178.44\ kW \cong 180\ kW$$

Luego de calcular esta potencia es necesario calcular el torque que se tiene en la entrada del reductor donde la velocidad es 1,028 RPM, para ello se despeja el Torque de la ecuación de Potencia.

$$T = \frac{P \cdot K}{N \cdot 0.746}$$

$$T = \frac{(180\ kW) \cdot (7{,}124)}{(1{,}028\ RPM) \cdot 0.746} \cong 1672\ N \cdot m$$

Luego de la figura 34, se tiene que la polea motriz es de 236 mm de diámetro, y la polea accionada es de 400 mm de diámetro, es por esto, por lo que se calcula la relación de velocidades.

$$N_1 \cdot D_1 = N_2 \cdot D_2$$

Donde.

$$N_1 = velocidad\ del\ eje\ motriz = ¿$$
$$D_1 = diametro\ de\ la\ polea\ motriz = 236\ mm$$
$$N_2 = velocidad\ del\ eje\ eje\ accionado = 1{,}028\ RPM$$
$$D_2 = diametro\ de\ la\ polea\ accionada = 400\ mm$$

$$N_1 = \frac{N_2 \cdot D_2}{D_1}$$

$$N_1 = \frac{(1{,}025\ RPM) \cdot (400\ mm)}{(236\ mm)}$$

$$N_1 \cong 1{,}737\ RPM$$

Ahora se calcula el torque para la nueva velocidad.

$$T = \frac{(180\ kW) \cdot (7{,}124)}{(1{,}737\ RPM) \cdot 0.746} \cong 990\ N \cdot m$$

De lo anterior se tienen todos los datos requeridos para encontrar el motor adecuado que moverá el tornillo del extrusor.

.

Torque = 990 N-m

Potencia = 180 kW

Revoluciones = 1,737 RPM.

Ahora consultaremos la tabla del fabricante de motores figura 35 (SIEMENS, 2019).

Figura 35. **Valores eléctricos motores serie 1LE0141 SIEMENS**

Potencia		Referencia del motor	Tamaño constructivo	Rated Speed	Eficiencia 100%	Factor de potencia	Corriente nominal			Torque nominal	Datos de arranque			Peso IM B3
kW	HP	-		rpm	%	-	220V A	380V A	440V A	Nm	Corriente de arranque x In	Torque de arranque x Tn	Torque Máximo x Tn	kg
Datos eléctricos motores Serie 1LE0141 IE2 4 Polos 1800 rpm														
0,55	0,75	1LE0141-0DB26-4AA4	80M	1720	75,5	0,77	2,55	1,46	1,26	3,1	6	2	2,7	14,5
0,75	1	1LE0141-0DB36-4AA4	80M	1705	78,0	0,78	3,2	1,86	1,61	4,2	6	2	2,7	15,5
1,1	1,5	1LE0141-0EB06-4AA4	90S	1730	84,0	0,79	4,4	2,55	2,2	6,1	6	2	2,7	22
1,5	2	1LE0141-0EB46-4AA4	90L	1720	84,0	0,81	5,8	3,35	2,9	8,3	6	2,6	2,7	25
2,2	3	1LE0141-0EB86-4AA4	90L	1740	87,5	0,79	8,5	4,9	4,25	12,1	7,5	2,6	3	28
3	4	1LE0141-1AB56-4AA4	100L	1735	87,5	0,83	10,8	6,2	5,4	16,5	7,5	2,5	3	45
3,7	5	1LE0141-1AB86-4AA4	100L	1720	87,5	0,83	13,5	7,8	6,7	20,5	7,5	2,5	3	45
5,5	7,5	1LE0141-1BB86-4AA4	112M	1750	89,5	0,78	21	12,2	10,5	30,0	8,5	2,5	3,5	50
7,5	10	1LE0141-1CB26-4AA4	132M	1760	89,5	0,82	26,5	15,4	13,3	40,7	8,5	2,5	3,5	70
11	15	1LE0141-1CB86-4AA4	132M	1760	91,0	0,82	39,5	23	19,7	59,7	8,5	2,5	3,5	85
15	20	1LE0141-1DB46-4AA4	160L	1760	91,0	0,84	51	29,5	25,5	81,4	8	2,2	3,5	110
18,5	25	1LE0141-1DB86-4AA4	160L	1765	92,4	0,88	60	35	30	100	8	2,2	3,5	140
22	30	1LE0141-1EB46-4AA4	180L	1775	92,4	0,84	76	44	38	118	8	2,4	3	180
30	40	1LE0141-2AB46-4AA4	200L	1775	93,0	0,85	99	57	49,5	161	8	2,7	3	245
37	50	1LE0141-2AB86-4AA4	200L	1775	93,0	0,84	125	73	63	199	8	2,7	3	245
45	60	1LE0141-2BB26-4AA4	225M	1780	93,6	0,85	148	85	74	241	8	2,7	3	340
55	75	1LE0141-2BB86-4AA4	225M	1780	94,1	0,85	184	106	92	295	8	2,7	3	340
75	100	1LE0141-2CB86-4AA4	250M	1785	94,5	0,86	240	139	120	401	8	2,6	3	475
90	125	1LE0141-2DB23-3AA4	280M	1786	94,5	0,86			151	481	8	2,9	3	660
110	150	1LE0141-2DB83-3AA4	280M	1786	95,0	0,86			180	588	8,5	2,9	3	670
150	200	1LE0141-3AB23-3AA4	315M	1788	95,0	0,88			235	801	8,5	2,5	2,8	1050
185	250	1LE0141-3AB63-3AA4	315L	1788	95,0	0,88			295	988	8,5	2,5	2,8	1050

Fuente: SIMOTIC. (2019). Portafolio de motores. [Figura]. Recuperado de SIMOTIC portafolio de motores SIEMENS.

El motor seleccionado, en base a los datos calculados, las consideraciones que se expusieron al inicio de esta sección y la tabla de

selección de la figura 35, es el modelo 1LE0141-3AB63-3AA4. A continuación las características del motor.

Tabla III. **Variables para selección de motor**

Variables del motor seleccionado	
Suministro de energía eléctrica	440 VAC, 60 Hz
Tipo de cierre de carcasa	Hierro fundido
Método de arranque	ASD (Adjustable Speed Drive)
Carga	185 kW
Velocidad máxima	1788 RPM
Par	988 N-m
Método de enfrimanieto	Autoventilado
Eficiencia	95.0%
Grado de protección	IP 55
Clase	B

Fuente: elaboración propia, realizado con Mircosoft Excel.

Figura 36. **Motor Siemens Serie 1LE0141**

Fuente: SIMOTIC. (2019). *Portafolio de motores*.

4.1.3.3. Mantenimiento motor Siemens 1LE0141

	El mantenimiento debe ser efectuado exclusivamente por operadores expertos y en conformidad con las normas vigentes en materia de seguridad laboral y medioambiental. No desechar en el medio ambiente líquidos contaminantes, piezas sustituidas ni residuos de las operaciones de mantenimiento. ¡Nunca efectuar reparaciones improvisadas!
	Antes de intervenir en el grupo, desactivar la alimentación de este, tomando precauciones ante la reactivación involuntaria, y, en cualquier caso, ante la movilidad de las partes de dicho grupo, esperar que el grupo haya alcanzado la temperatura ambiente. Informar al personal que opera y al que se encuentra en las cercanías, señalando adecuadamente las zonas cercanas e impidiéndoles el acceso.

Fuente: SIMOTIC. (2019). *Portafolio de motores*..

- Mantenimiento periódico

    - Inspeccione el motor en intervalos de tiempo regulares;
    - Elimine depósitos de polvo, aceite y suciedad en la tapa del ventilador para mantener una buena ventilación y permitir un correcto enfriamiento del motor; controle las condiciones de los retenes y de los v-ring;

- Controle las condiciones de las conexiones eléctricas y mecánicas y de los pernos de fijación;
- Controle las condiciones de los rodamientos prestando atención a ruidos anómalos o vibraciones.

Si fuera necesario desmontar el motor y acceder a sus partes internas, se requiere la intervención de personal cualificado utilizando herramientas y métodos de trabajo adecuados.

Tabla IV. **Mantenimiento de motor**

Área de inspección	**Componente para inspeccionar**	**Descripción**	**Intervalo de inspección**			**Acción correctiva**
			Diario	Anual	Mes	
	Conductores	Verifique que el aislamiento de los cables no esté rotos y deteriorados		X		Reemplace los conductores
General	Carcasa	Compruebe si hay vibraciones o ruidos inusuales	X			Comprobar la ubicación de la falla y corregir
	Fuente de alimentación Voltaje	Compruebe que los voltajes del circuito principal y el de control	X			Inspeccionar el Voltaje de suministro

Continuación tabla IV.

Área de inspección	Componente para inspeccionar	Descripción	Intervalo de inspección			Acción correctiva
			Diario	Anual	Mes	
Ventilación	Ventilador	Compruebe si hay depósitos de polvo, aceite y suciedad en la tapa del ventilador.		X		Limpiar
Tapa posterior y anterior	Rodamientos	Controle las condiciones de los rodamientos prestando atención a ruidos anómalos o vibraciones			X	Reemplazar si fuera necesario

Fuente: elaboración propia, realizado con Mircosoft Excel.

- Instrucciones de desmontaje/montaje

- Desmontaje: libere el motor de las piezas de acoplamiento con la parte operadora; quite la tapa del ventilador y el ventilador sacando las correspondientes partes de fijación; quite la chaveta; desenrosque y quite los tirantes que mantienen ensamblado el motor; quite la brida o el escudo delantero extrayéndola de la carcasa y del rodamiento; extraiga el rotor que soporta el escudo opuesto cuidando de no dañar el bobinado.

- Sustitución de rodamientos: extraiga los rodamientos utilizando un expulsor; el montaje de nuevos rodamientos se debe realizar con una prensa apoyada en el anillo interno o en caliente; para todos los tipos de motores se prevén rodamientos blindados prelubricados que no requieren engrase.

- Montaje: se debe realizar siguiendo la secuencia inversa a la indicada para el desmontaje; la única advertencia que se puede agregar es la de tener cuidado en el montaje de los retenes. Se debe limpiar previamente la zona y orientar los retenes de modo correcto, con su concavidad dirigida hacia afuera. Al finalizar los trabajos de mantenimiento y de inspección, se debe controlar la seguridad y las funciones.

4.2. Cálculo de Protecciones para Motor AC250HP

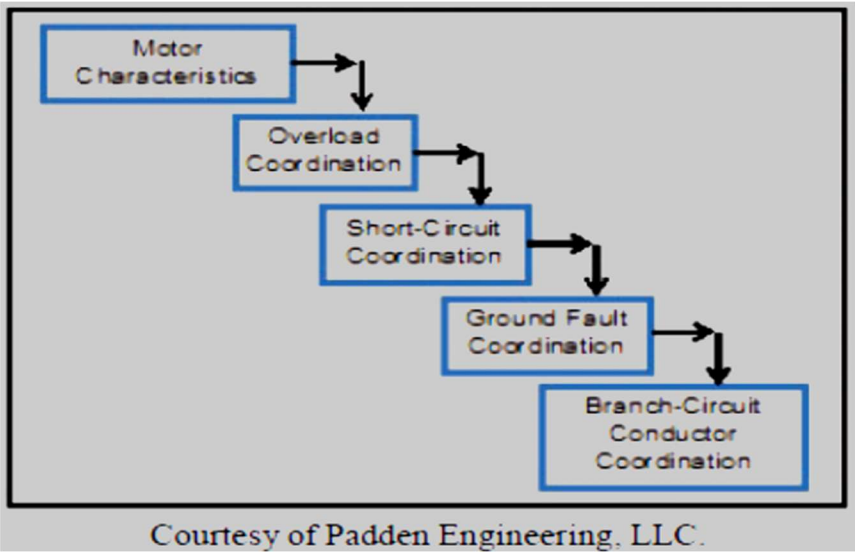
Los dispositivos de protección del motor permiten que el motor arranque y funcione, e inician el disparo y la omisión del circuito de motor del sistema de alimentación cuando el motor se detiene, no acelera, consume corriente excesiva, se sobrecalienta, vibra en exceso y / o muestra otros síntomas de condiciones motoras inadecuadas. La detección de condiciones inadecuadas es a través de la medición de voltaje, corriente, temperatura, frecuencia, armónicos, vibraciones y velocidad, donde corresponda. Sin embargo, para la mayoría de los motores pequeños (es decir, menos de 220 kW [300 hp]), la sobre corriente es el medio de detección más frecuente. En base a esto y tomando en cuenta que este motor está por debajo de esta clasificación, se centra en la selección de protecciones en base a la corriente.

IEEE 3004.8-2016 indica que los sistemas de bajo voltaje (LV) son nominalmente de 1000 V o menos. En la actualidad, existen motores con un

máximo de 575 V y 750 kW (1000 hp), siendo estos los motores más típicos de bajo voltaje (LV) a 60Hz. Para el caso de estudio el motor es de 185kW, 440 VAC, 60Hz, que está dentro de la clasificación de motores de bajo voltaje, por tal razón se enfoca en las protecciones a este tipo de motor.

En la siguiente figura se indican las 5 áreas principales a tomar en cuenta para la coordinación de protecciones de bajo voltaje LV. Según Lorraine K. Padden e IEEE STD 3004.8-2016, “para alcanzar el mejor rendimiento de un estudio de coordinación de protecciones es necesario realizar los diagramas unifilares y realizar el análisis de corto circuito”, por esta razón se abordar primero el análisis de corto circuito para esta instalación y luego se seleccionan las protecciones de acuerdo con las 5 áreas. (figura 37)

Figura 37. **Cinco áreas principales de estudios de coordinación para motores de LV (bajo voltaje)**



Fuente: IEEE Std 3004.8-2016 IEEE (2016). *Recommended Practice for Motor Protection in Industrial and Commercial Power Systems*. p. 59.

4.2.1. Corto circuito

Se aborda el estudio de corto circuito según la recomendación anterior, para luego centrarnos en la coordinación de protecciones para el motor de nuestra instalación, de acuerdo con las cinco áreas principales de la figura 37.

- Características de motor.
- Coordinación de sobrecarga.
- Coordinación de corto circuito.
- Coordinación de fallas a tierra.
- Coordinación de conductores de circuito derivado.

Un corto circuito es un fenómeno eléctrico que ocurre cuando dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial se ponen en contacto entre sí, caracterizándose por elevadas corrientes circulantes hasta el punto de falla. Se puede decir que un corto circuito es también el establecimiento de un flujo de corriente eléctrica muy alta, debido a una conexión por un circuito de baja impedancia, que prácticamente siempre ocurren por accidente. La magnitud de la corriente de corto circuito es mucho mayor que la corriente nominal o de carga que circula por el mismo. Aún en las instalaciones con las protecciones más sofisticadas se producen fallas por corto circuito.

4.2.1.1. Cálculo de corriente de corto circuito para sistemas de bajo voltaje

El procedimiento de cálculo de corriente de cortocircuito de bajo voltaje difiere muy poco del utilizado para realizar tareas de cortocircuito de primer ciclo en sistemas de alta tensión. Todos los valores nominales del motor conectado se

incluyen como fuentes que contribuyen a fallas, y esta contribución se basa en la reactancia subtransitoria de las máquinas. La contribución del sistema primario debe ser equivalente al calculado para su servicio de cortocircuito de primer ciclo. Debido a la cantidad y pequeño clasificaciones de motores que generalmente se encuentran en sistemas de bajo voltaje, es habitual utilizar un valor típico para su reactancia equivalente en la red de cortocircuito de bajo voltaje.

En base a IEEE STD. 141-1993 (RED BOOK), este valor de reactancia típico es del 25% (0.25 por unidad) basado en la clasificación individual del motor o la clasificación total de un grupo de motores, ambos en kilovoltamperes.

El cálculo de falla presentado aquí es para un sistema trifásico de 480 V, ilustrado por el diagrama unifilar de la figura 38.

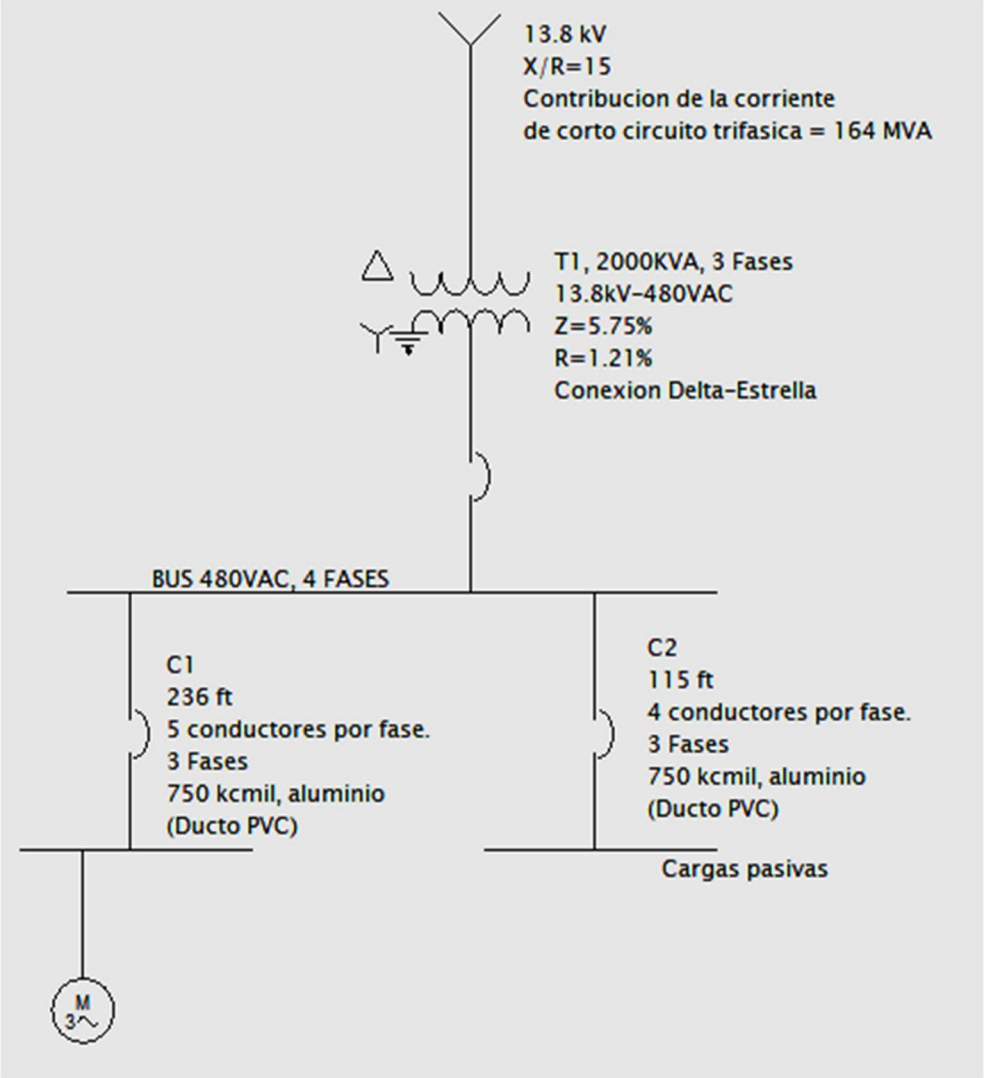
Según, STD_141_1993_Red_Book_IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. El procedimiento para calcular las corrientes de cortocircuito del sistema industrial consiste en los siguientes pasos:

- Paso 1: preparar diagrama unifilar del sistema
- Paso 2: recopilar y convertir datos de impedancia
- Paso 3: combinar impedancias
- Paso 4: calcular la corriente de cortocircuito.
- Paso 5: Diagrama unifilar del sistema

El diagrama unifilar acá presentado corresponde al sistema donde será conectado el nuevo motor y variador de AC. Iniciando desde la línea de alta tensión de 13.8 kV, luego el transformador para reducción de voltaje donde el devanado primario corresponde a 13.8 kV y el devanado secundario es de 480 VAC. Luego existe una barra donde existen dos derivaciones, la primera C1 es para la conexión del motor y variador y la segunda C2 es utilizada para cargas

pasivas. En el diagrama se aprecian cada uno de los valores correspondientes a cada parte de este.

Figura 38. **Sistema de bajo voltaje**



Fuente: elaboración propia, realizado con Cadi-Simu.

Potencia base $P_b = 2000kVA$, y el voltaje base $E_b = 480\ VAC$

Donde:

Corriente base $I_b = \frac{KVA\ (1000)}{\sqrt{3} \cdot E_b} = \frac{(2000)(1000)}{\sqrt{3} \cdot 480} = 2{,}405.63$

Impedancia base $Z_b = \frac{\frac{E_b}{\sqrt{3}}}{I_b} = \frac{\frac{480}{\sqrt{3}}}{2{,}405.63} = 0.1552\ p.u$

Fuente de impedancias 13.8 kV

Se tiene que: $Z_s = \frac{kVA\ base}{corriente\ de\ corto\ circuito\ kVA} = \frac{2000}{873000} = 0.00229\ p.u.$

Donde $Z_s = \sqrt{(R_s)^2 + (X_s)}^2$ y $\frac{X_s}{R_s} = 15$, el valor de $R_s = \frac{Z_s}{\sqrt{1+(15)^2}}$

$R_s = 0.000152\ p.u$, y el valor de $X_s = 15 \cdot R_s = 0.00228\ p.u$

Impedancia del transformador de 2000kVA. El transformador provee la información de la impedancia esta es 5.75% auto refrigerado rango base de 2000kVA, y la resistencia es 1.21% (R_{T1}).

Donde la reactancia $X = \sqrt{Z^2 - R^2} = 5.62\%(X_{T1})$. Los valores de rendimiento son los siguientes:

$$R_{T1} = \frac{kVA\ base}{kVA\ trasnformador} * \frac{\%R_{T1}}{100} = \frac{2000}{2000} * \frac{1.21}{100} = 0.0121\ p.u$$

$$X_{T1} = \frac{kVA\ base}{kVA\ trasnformador} * \frac{\%X_{T1}}{100} = \frac{2000}{2000} * \frac{5.62}{100} = 0.0562\ p.u$$

Cable C_1 (236 pies, 5 conductores por fase de 750 kcmil, tres fases, en ducto no magnético). De las tablas publicadas, la resistencia ac R_{C1} es 0.029 Ω por conductor por 1000 pies, y la reactancia X_{C1} es 0.038 Ω por conductor por 1000 pies.

Para 236 pies de 5 conductores paralelos,

$$R_{C1} = \frac{0.026 * 236}{5 * 1000} = 0.00123\ \Omega$$

$$X_{C1} = \frac{0.038 * 236}{5 * 1000} = 0.00179\ \Omega$$

Convertir impedancias a valores por unidad.

$$R_{C1} = \frac{ohms\ actuales}{ohms\ base} = \frac{0.00123}{0.1552} = 0.00792\ p.u$$

$$X_{C1} = \frac{ohms\ actuales}{ohms\ base} = \frac{0.00179}{0.1552} = 0.01153\ p.u$$

Cable C_2 (115 pies, de cuatro cables de cobre por fase de 750 kcmil, de tres fases en ducto no magnético). De las tablas publicadas, la resistencia ac R_{C2} es 0.029 Ω por conductor por 1000 pies, y la reactancia X_{C2} es 0.038 Ω por conductor por 1000 pies.

Para 200 pies de 2 conductores paralelos,

$$R_{C2} = \frac{0.029 * 115}{4 * 1000} = 0.0008337\ \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{0.038 * 115}{4 * 1000} = 0.001092\ \Omega$$

Convertir impedancias a valores por unidad.

$$R_{C2} = \frac{ohms\ actuales}{ohms\ base} = \frac{0.0008337}{0.1552} = 0.005371\ p.u$$

$$X_{C2} = \frac{ohms\ actuales}{ohms\ base} = \frac{0.001092}{0.1552} = 0.007036\ p.u$$

Contribución de motores: La carga del motor 250 hp, en la barra de control. Suposiciones típicas hechas para pequeños motores a 480 V son de 1 hp = 1 kVA, y la reactancia subtransitoria promedio es del 25%. La resistencia es 4.167%, basada en una relación típica X / R de 6.

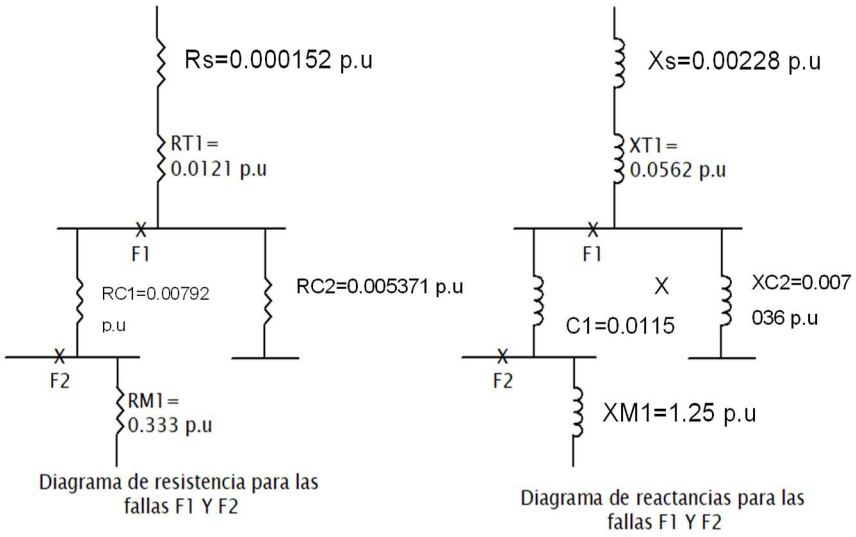
Convirtiendo impedancias por unidad en la base de 2000 kVA.

$$R_{M1} = \frac{kVA\ base * \%R_{M1}}{kVA\ motor * 100} = \frac{2000 * 4.167}{250 * 100} = 0.333\ p.u.$$

$$X_{M1} = \frac{kVA\ base * \%X_{M1}}{kVA\ motor * 100} = \frac{2000 * 25}{400 * 100} = 1.25\ p.$$

- Paso 2: dibujos por separado los diagramas de resistencia y reactancia aplicable a cada lugar de falla, F1 y F2.

Figura 39. **Diagramas de resistencia y reactancia para F1 y F2**



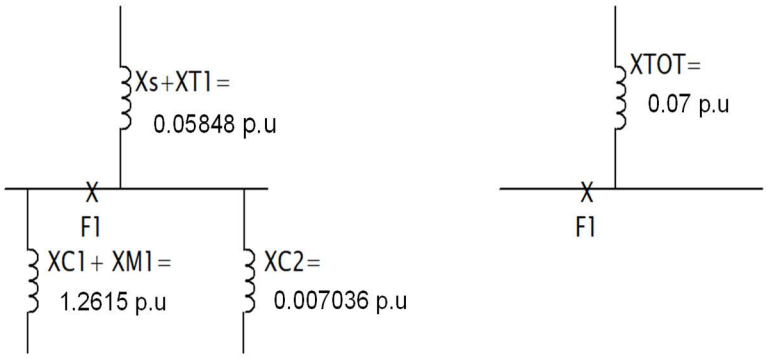
Fuente: elaboración propia, realizado con Cade-Simu.

- Paso 3: reducir para cada lugar de falla los diagramas de R y X para calcular los valores de corriente en p.u.

  Diagramas reducidos de R y X para la falla de corto circuito en F1.

  Reduciendo X para F1.

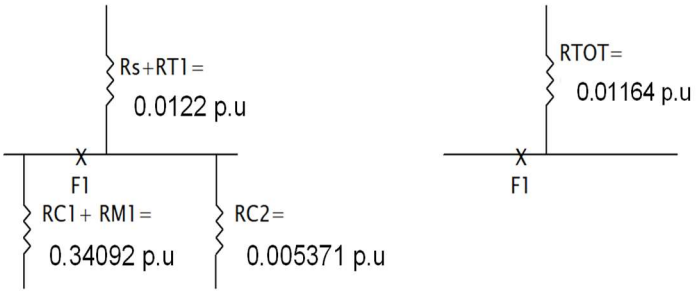
Figura 40. **Diagramas de reactancias para F1**



Fuente: elaboración propia, realizado con Cade-Simu.

Reduciendo R para F1

Figura 41. **Diagramas de resistencias para F1**

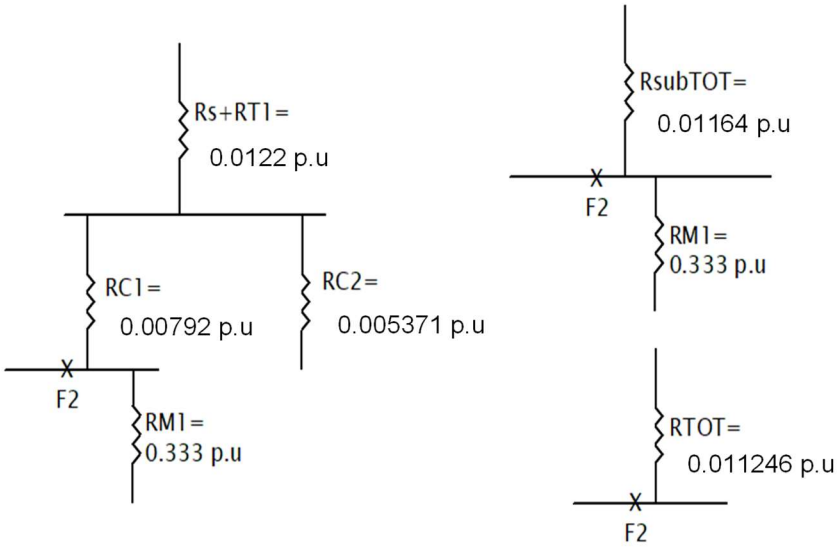


Fuente: elaboración propia, realizado con Cade-Simu.

Diagramas reducidos de R y X para la falla de corto circuito en F2.

Reduciendo R para F2.

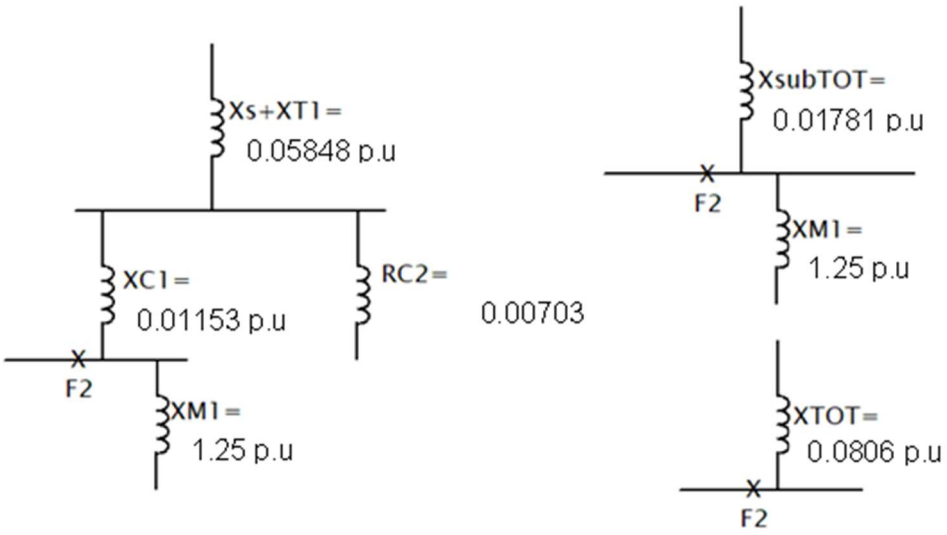
Figura 42. **Diagramas reducidos de R y X**



Fuente: elaboración propia, realizado con Cadi-Simu.

Reduciendo X para F2.

Figura 43. **Diagrama de reactacias F2**



Fuente: elaboración propia, realizado con Cadi-Simu.

- Paso 4: calcular la corriente de corto circuito, para F1 y F2..

La Impedancia total Z es: $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0.01164^2 + 0.0697^2} = 0.07\ p.u.$

La corriente simétrica total de corto circuito en F1 es $\left(\frac{E}{Z}\right) \cdot corriente\ base.$

$$\frac{corriente\ base}{Z\ p.u} = \frac{2405.63}{0.07} = 37{,}765\ A$$

La Impedancia total Z es:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0.01124^2 + 0.0806^2} = 0.0814\ p.u.$$

La corriente simétrica total de corto circuito en F2 es $\left(\frac{E}{Z}\right) \cdot corriente\ base$.

$$\frac{corriente\ base}{Z\ p.u} = \frac{2406}{0.0814} = 29{,}565\ A$$

4.2.2. Características del motor

Lo primero es realizar la curva de arranque del motor, corrientes asimétricas de arranque, y los tiempos de arranque en frio y caliente del motor, todo esto se agrega a la gráfica de coordinación. Los rangos y los ajustes de los dispositivos de protección se seleccionan para coordinar con las características del motor.

Para el caso de este estudio se muestran los datos de placa del motor seleccionado.

- General – 250 hp, 440 V, tres fases, 1788 RPM.
- Forma constructiva – Totalmente cerrado.
- Diseño – B.
- Datos de placa Corriente a plena Carga – 295 A
- Factor de servicio – 1.15
- Corriente de rotor bloqueado – 1825 A (Según NEC Tabla 430-251B)
- Factor de potencia – 0.88
- Corriente de arranque – 8.5 x corriente nominal – 2508 A (obtenido de la ficha técnica del motor.

Según “Prabhakara, F. S., R. L. Smith Jr., and R. P. Stratford, Industrial and Commercial Power Systems Handbook. New York: The McGraw-Hill Companies, 1995, pp. 8–46.” (Prabhakara Smith & Stra, 1995) esta es, la

bibliografía que IEEE 3004.8 recomienda para la coordinación de las distintas áreas del motor y para la elaboración de la gráfica de coordinación de protecciones se debe de proceder de la siguiente manera.

Obtener la corriente de carga completa del motor (de la placa de identificación del motor) Para el caso de estudio la corriente a plena carga de indica el fabricante es de 295 Amp.

Obtener la corriente de rotor bloqueado del fabricante y la tabla NEC 430-251 B (tabla 5) Para el caso desarrollado la corriente de rotor bloqueado según la tabla 5 es de 1,825 Amp.

Tabla V. **Maxima corriente de rotor bloqueado**

Rango	Máxima Corriente de Rotor Bloqueado. Tres fases, 460 V
hp	Clase B, C & D
200	1450
250	1825
300	2200

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Tabla NEC 430-251 (B).

También se debe de realizar la correcta determinación del tiempo de arranque del motor que es una función de la inercia de la carga, la curva de par velocidad y la tensión de arranque. Siguiendo la recomendación de la bibliografía se tomarán 10 segundos que es lo sugerido para cargas de alta inercia, asumiendo el 100% de la carga y a voltaje nominal.

Determinar la corriente de arranque asimétrica, (típicamente 1,76 veces la corriente de rotor bloqueado para 1/2 ciclos).

La curva de arranque del motor normalmente muestra la simetría de corriente de arranque, pero se debe de tomar en cuenta que durante el arranque inicial la corriente es asimétrica con la máxima ocurrencia a ½ ciclo de operación. Dado que los dispositivos de protección son sensibles a este pico de corriente se debe de utilizar el mejor juicio de ingeniería para elegir el tipo y la configuración del dispositivo de protección para tener en cuenta la corriente asimétrica durante la puesta en marcha para evitar falsos disparos. Una corriente típica de arranque asimétrica seria 1.76 veces la corriente de rotor bloqueado. Para el caso de este estudio la corriente de arranque asimétrica de ½ ciclo será:

$$1.76 \cdot corriente\ de\ rotor\ bloqueado = 1.76 \cdot 1{,}825\ Amp = 3{,}212\ Amp.$$

4.2.2.1. Tiempos de arranque en frío y en caliente (del fabricante)

Tiempos de parada frio y caliente, se refiere en el caso de caliente, a la temperatura de funcionamiento del motor y en el caso de frio, a la temperatura ambiente del motor. Estos tiempos son las veces máximas en que el rotor puede estar bloqueado cuando se aplica voltaje nominal.

Tabla VI. **Tiempos de parada caiente y frio**

% Rango de Voltaje	**100**	**90**	
Tiempo de parada seguro, Motor frio	19	24	segundos
Tiempo de parada seguro, Motor caliente	15	21	segundos

Fuente: propia, datos obtenidos de hoja de información técnica del motor.

Con estos datos se debe de: trazar la curva simétrica de arranque, trazar la corriente asimétrica de arranque, trazar los tiempos de arranque en frio y

caliente del motor. Para visualizar la curva característica del motor de 250 HP, donde están identificados todos estos puntos, ver la figura 41.

4.2.3. Coordinación de sobre carga

El dispositivo de sobrecarga está destinado a proteger el motor, aparatos de control del motor, y los conductores del circuito derivado de motor, contra el calentamiento excesivo debido a sobrecargas del motor y fallas en el arranque.

4.2.3.1. Configuración de sobrecarga

La corriente de placa de identificación del motor se utiliza para calcular el ajuste de disparo por sobrecarga. Se calcula la configuración máxima de un dispositivo de sobrecarga de acuerdo con NEC, secciones 430-32 a 34. Los datos más importantes para este caso se encuentran en las tabla 7. La tabla 8, tomado de la sección 430-32 del NEC, proporciona la clasificación o configuración máxima normalmente permitida de dispositivos de sobrecarga o ajuste de sobrecarga.

Tabla VII. **Ajuste o clasificación de sobrecarga para motores de más de 1 caballo de fuerza**

Ajuste o clasificación de sobrecarga para motores de más de 1 caballo de fuerza.	
Motor	**% de la placa de identificación del motor**
Factor de servicio no menor que 1.15	125 %
Temperatura no superior a 40°C	125%
Todos los demás motores.	115%

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de Tabla NEC 430-32 (a).

4.2.3.2. Tipo de sobrecarga

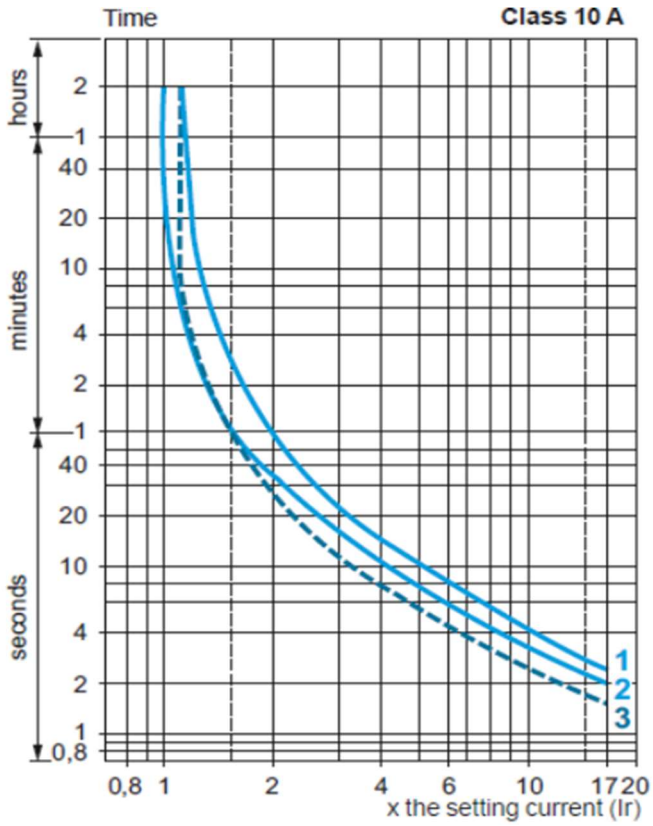
A continuación, se determina el dispositivo de sobrecarga. Normalmente, la protección contra sobrecarga se proporciona mediante un relé de sobrecarga térmica bimetálica marca Legrand CTX³ 400 Clase 10, el cual se dispara entre 10 a seis veces del rango de corriente.

4.2.3.3. Trazar la curva de coordinación de sobrecarga

La curva del dispositivo de sobrecarga se selecciona para cumplir con los requisitos del NEC antes descritos. Una curva arriba y a la derecha de la curva de arranque del motor y debajo de los tiempos de arranque en frio y caliente del motor es la selección preferida. La curva de sobrecarga seleccionada se traza en el gráfico de coordinación de protecciones, en la figura 41, se muestra el diagrama de coordinación que muestra un bimetálico Clase 10, con ajuste de disparo de 125 % de la corriente a plena carga de las características de placa del motor. Para este caso de estudio la corriente a plena carga es de 295 A, lo que lleva al ajuste de disparo del bimetálico de 370 A.

En la figura 44**,** se aprecia la curva de disparo de un bimetálico Clase 10, donde la curva 1 corresponde a una operación trifásica balanceada con un corto periodo de funcionamiento o estado frio. Y la curva 3 corresponde también a una operación trifásica balanceada con un largo periodo de funcionamiento o estado caliente. Estas curvas de protección contra sobrecarga se han agregado en el gráfico de protecciones para el motor de estudio 250 HP de la figura 47.

Figura 44. **Curva de disparo de bimetálico Clase 10**



Fuente: Schneider Electric (2021). *Dimensiones y montaje*. p. B11/4 a B11/17.

4.2.4. Protección contra corto circuito

El dispositivo de cortocircuito está diseñado para proteger el motor, dispositivos de control del motor y conductores de circuito derivado contra sobrecorrientes debido a corto circuitos y fallas a tierra. Estos dos tipos de fallas son los que se trataran para la coordinación de protecciones del motor de estudio.

4.2.4.1. Tipo de dispositivo de protección contra corto circuito

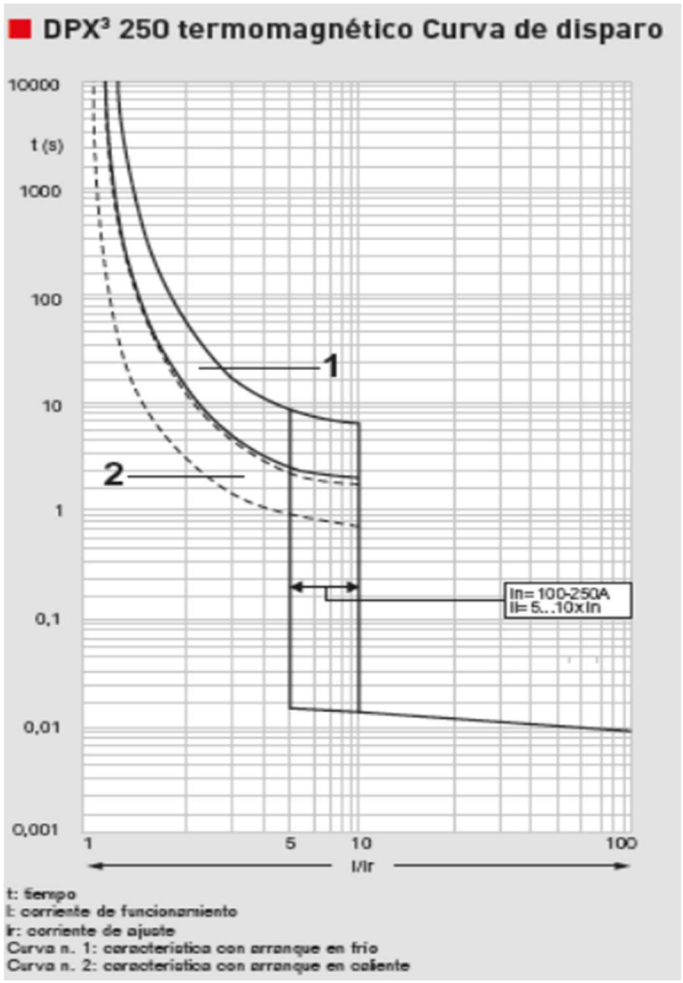
Como primer paso se debe de determinar el tipo de dispositivo de protección contra corto circuito. Para el caso de este estudio, se ha seleccionado un disyuntor termomagnético para la protección contra corto circuito, el cual esta dimensionado para proporcionar cierta protección de respaldo si el dispositivo de sobrecarga térmica falla.

4.2.4.2. Clasificación de interrupción del dispositivo de cortocircuito

Se debe de seleccionar la clasificación de interrupción del dispositivo de corto circuito para que esté por encima de la corriente de falla momentánea (corriente trifásica simétrica de ½ ciclo). Para este caso de estudio, en el apartado (1.6.1.1 Corto Circuito), se ha calculado la corriente asimétrica trifásica de ½ ciclo, siendo esta 29,565 A, con una relación X/R de 6.59. El factor de multiplicación es 1.18, por lo tanto, la mínima clasificación de interrupción para el disyuntor termomagnético es de 34,885.7 A, el interruptor termomagnético seleccionado es marca Legrand serie DPX 630 (250-630 Amp), 36 kA. 480 VAC.

En la figura 45, se aprecia la curva de disparo para el disyuntor seleccionado, en donde la curva 1, representa la característica de arranque en frio y la curva 2, representa la característica de arranque en caliente. Estas curvas de protección contra corto circuito se han agregado en el gráfico de protecciones para el motor de 250 HP de la figura 47.

Figura 45. **Curva de disparo termomagnético DPX³**



Fuente: Protección Industrial. (2017). *Legrand*. Recuperado de Catalogo Protección Industrial Legrand.

4.2.4.3. Gráfico de coordinación de dispositivos de corto circuito

La curva del dispositivo de corto circuito se selecciona para cumplir los requisitos de corto circuito determinados. Normalmente la curva del disyuntor está por encima y a la derecha de la tensión máxima de la curva simétrica del

motor. La porción de corto circuito instantáneo de la curva del dispositivo de cortocircuito debe estar a la derecha de la corriente de arranque asimétrica. En la figura 41, se muestra un disyuntor termomagnético de 630 A. Este dispositivo se coordina bien con la curva de sobrecarga, la curva de arranque del motor y la corriente de arranque asimétrica. La curva del corte de corriente por cortocircuito de este dispositivo es de ½ ciclo, de la corriente de falla trifásica simétrica.

4.2.5. Detección de falla a tierra

Con frecuencia las instalaciones industriales tendrán altos valores de resistencia a tierra para sistemas de bajo voltaje, para el caso de estudio el sistema de puesta a tierra es de alta resistencia por lo tanto no se muestran las curvas del dispositivo de falla a tierra.

4.2.6. Protección de conductores de circuito derivado

Los conductores deben estar protegidos contra daños por exceso de sobrecorriente. Los dispositivos de protección se deben de elegir según las secciones de NEC 110-10, 240-3, y 240-6. Esto basado en ampacidades como se especifica en la sección NEC.

Básicamente el conductor se elige de la siguiente manera.

- La ampacidad mínimo-requerida se calcula en base a la corriente a plena carga del motor.

- El tamaño del conductor, basado en el aislamiento tipo y rango de temperatura, es seleccionado de las tablas del NEC.

- El tipo de aislamiento y la temperatura real. Si la ampacidad es demasiado baja después de la reducción de potencia entonces se selecciona un conductor más grande.

- Se consulta al fabricante del conductor sobre limitaciones de tamaño u otras consideraciones. El conductor debe verificarse para el voltaje, caída debido al flujo de carga y al arranque del motor.

4.2.6.1. Cálculo de la ampacidad mínima del conductor

Se calcula la ampacidad mínima del conductor de acuerdo con la sección 430-22 de NEC. La ampacidad mínima es de 125% de la corriente a plena carga para motores de servicio continuo. El valor de corriente a plena carga para el caso de estudio, que es un motor de 185kW, es de 295 Amp, dado esto la ampacidad mínima del conductor será 368 Amp (125% de 295 Amp).

Ampacidades del conductor sin reducción de potencia.

Las ampacidades de los conductores se pueden determinar bajo las disposiciones de la sección 310-16 del NEC, (Tablas NEC). Ver tabla 8.

Tabla VIII. **Extracto de tabla NEC 310-16**

“Allowable Ampacities of Insulated Conductors Rated 0 Through 2000 Volts, 60°C Through 90°C (140°F Through 194°F), Not More Than Three Current-Carrying Conductors in Raceway, Cable, or Earth (Directly Buried), Based on Ambient Temperature of 30°C (86°F)”			
Size	**60 °C**	**75°C**	**90°C**
AWG or kcmil	**Types TW, UF**	**Types RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW**	**Types TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2**
3/0	165	200	225
4/0	195	230	260
250	215	255	290
300	240	285	320
350	260	310	350
400	280	335	380
500	320	380	430
600	355	420	475

Fuente:elaboración propia con datos obtenidos de Tabla NEC 310-16.

El conductor de tamaño mínimo para el caso de estudio se obtiene de la columna 4 para tres conductores con clasificación de 90°C, es # 400 AWG. La ampacidad de este conductor es de 380 Amp es mayor a la requerida que es de 368 Amp. Ampacidad del conductor con factores de reducción.

Se deben aplicar factores de reducción de ampacidad al conductor si corresponde.

- Factor de corrección por temperatura ambiente.

- Factor de corrección para más de tres conductores por fase que trasporte la misma corriente.

Para el caso de estudio, la temperatura ambiente en planta no supera los 30°C y solo se tiene un conductor por fase, por lo tanto, no se aplica el factor de corrección para la ampacidad del conductor la cual sigue siendo la elegida de la tabla 9 (380 Amp).

4.2.6.2. Gráfico de coordinación de conductores de circuito derivado

La curva de fusión del conductor se traza para verificar que la sobrecarga y/o los dispositivos de protección contra cortocircuitos protegen al conductor de daño contra sobrecarga excesiva y condiciones de avería.

La curva de fusión del conductor se traza en la trama de coordinación. La curva de fusión debe ser arriba y a la derecha de la curve de sobrecarga del motor.

Para el caso THHN tiene aislamiento de Polivinilo y tiene una clasificación de 90C y 150 ° C de temperatura de cortocircuito. (Ver tabla 9).

Los dispositivos de sobrecarga y cortocircuito proporcionan protección para este conductor.

Figura 46. **Simplifying Motor Coordination**

Table XII. Examples of 600 V Insulation Types and Their Maximum Short-Circuit Temperatures

Type of Insulation, NEC Designation	Continuous Temperature Rating (°C)	Short-Circuit Current Temperature Rating (°C)
THERMOSETTINGS:		
Cross-linked Polyethylene, XHHW, RHH, RHW	90 Dry, 75 Wet	250
Cross-linked Polyvinyl Chloride, XHHW	90 Dry, 75 Wet	250
Styrene Butadiene Rubber, RHW	75	200
Butyl Rubber, RHH, RHW, RHW-2	90 Dry, 75 Wet	200
Silicone Rubber, SA	125	250
THERMOPLASTICS:		
Polyvinyl Chloride, THW, THWN, THHN, THHW, TX	60, 75, 90	150

Lorraine K. (1997*). Simplifying Motor Coordination Studies*. Recuperado de IEEE Industry Applications Magazine.

Para realizar la curva del conductor seleccionado se procede a determinar la corriente de corto circuito, tomando como base los tiempos de protección de corto circuito -0,1 a 10 segundos.

Donde:

$$t = 0.0297\ log_{10}\left[\frac{T_2 + 134}{T_1 + 234}\right](\frac{A}{I})^2$$

Donde:

A = área del conductor - mils circulares

I = corriente de cortocircuito - amperios RMS

t = tiempo de cortocircuito – 0,1 a 10 segundos

T1 = límite de temperatura nominal de funcionamiento del aislamiento

T2 = límite de temperatura de cortocircuito de aislamiento máximo nominal

Puntos de daño calculados a partir de la ecuación anterior usando:

A = 400.000 cmils

t = tiempo de cortocircuito – 0,1 a 10 segundos

T1 = 75 ° C (tabla 10)

T2 = 150 ° C (tabla 10)

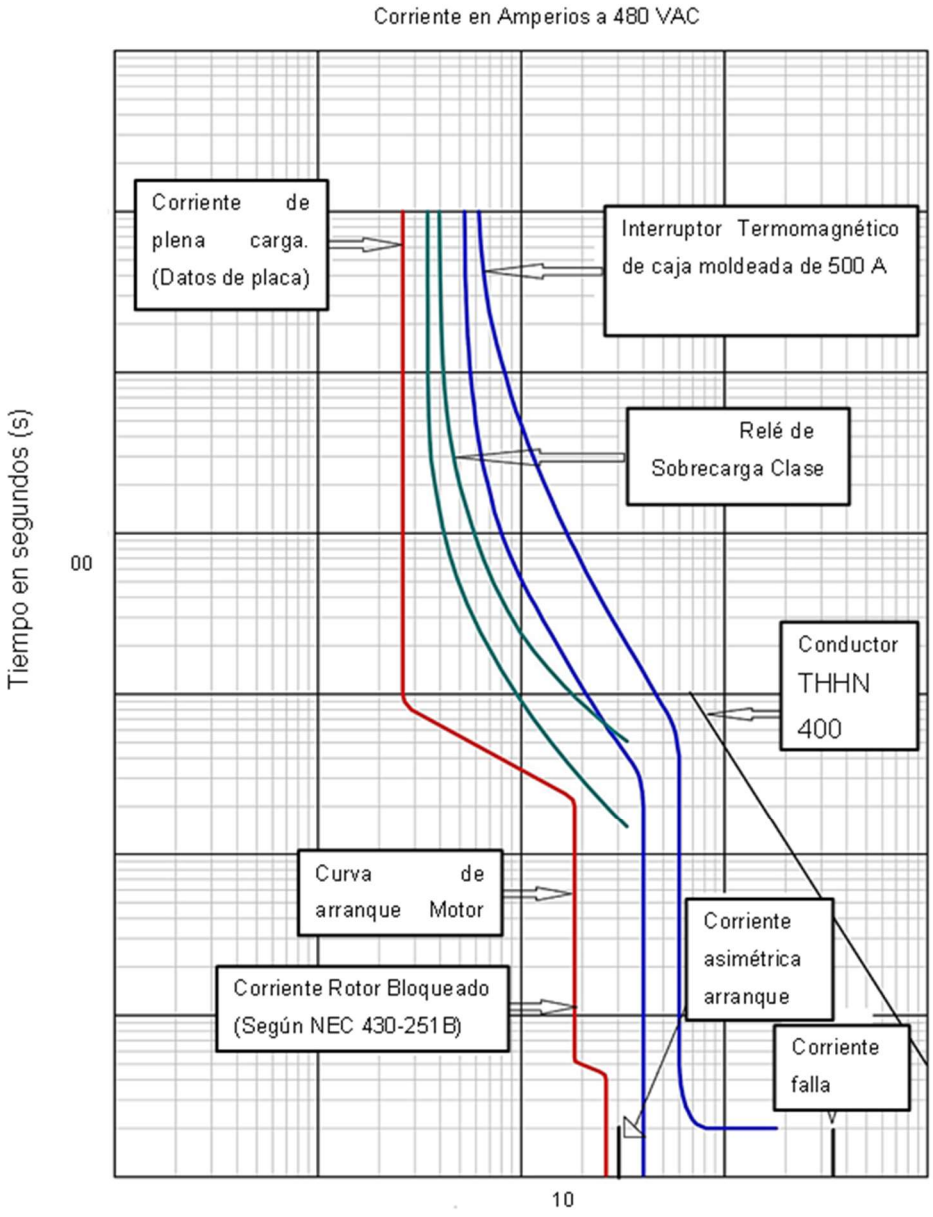
Tabla IX. **Tiempo y corriente**

Tiempo (seg)	Corriente (Amp)
10,0	6.693
0,1	67.002

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Mostrando curva de arranque, corriente asimétrica de arranque, tiempos de parada, curva de relé de sobrecarga, curva del dispositivo de corto circuito y curva de protección de conductores.

Figura 47. **Grafica de Coordinación para motor de 250 HP**



Fuente: elaboración propia, realizado con software Melshort.

4.3. Variadores de frecuencia

No existe un nombre único reconocido en la industria para los variadores de velocidad ajustable (ASD) (Adjustable speed driver), que es la terminología preferida por IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) terminología y que se utilizará en este documento. Los ASD son unidades de CA o CC y también se denominan unidades de velocidad variable (VSD, variable speed drives). Varios términos describen los ASD de CA: controlador de frecuencia ajustable (AFC, Adjustable frecuency controller), frecuencia ajustable variador de frecuencia (AFD, adjustable frecuency driver), variador de frecuencia (VFD, variable frecuency driver) y equipo de conversión de energía. Un convertidor de potencia convierte CA en CC; y un inversor invierte CC en CA:

Figura 48. **ASD típico utilizado en bajo voltaje**

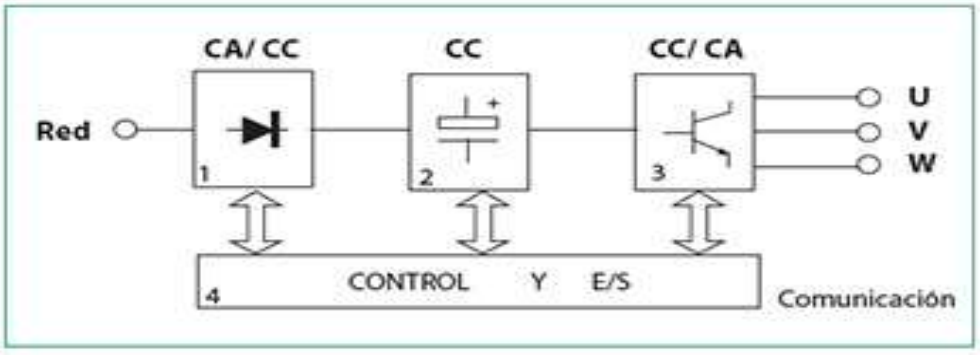
Fuente: IEEE std. 3004.8. (2016). *Typical LV adjustable speed drive*. Consultado el 22 de febrero 2022. Recuperado de IEEE std. 3004.8-2016 Recommended Practice for Motor Protection in Industrial an Commercial Power System.

Un ASD está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, permiten el control completo de motores eléctricos de inducción, los hay de C.C. (variación de la tensión), y de C.A. (variación de la frecuencia), los más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin bobinar (jaula de ardilla.) Los ASD son dispositivos automatizados de control para poder controlar la velocidad en los motores.

4.3.1. Diagrama de bloques de un ASD

Un diagrama de bloques es una representación gráfica del funcionamiento de cada uno de los componentes que forman un sistema dentro de un proceso.

Figura 49. **Diagrama de bloques de un ASD**



Fuente: Electro Industria. (2017). *Principio de funcionamiento de un VDF*. Consultado el 22 de febrero 2022. Recuperado de http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000.

En la figura 49, se aprecia el diagrama de bloques de los principales componentes de un ASD.

- Rectificador: partiendo de la red de suministro de C.A., monofásica o trifásica, se obtiene c.c. mediante diodos rectificadores.
- Bus de continua: condensadores de gran capacidad (y a veces también bobinas), almacenan y filtran la C.C. rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable, y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.
- Etapa de salida: desde la tensión del bus de continua, un oscilador convierte esta energía en una salida trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. Como elementos de conmutación, se usan principalmente transistores bipolares (BJT), CMOS o similares, IGBT, tiristores (SCR), GTO… etc. Las señales de salida, se obtiene por diversos procedimientos como troceado, mediante ciclo convertidores, o señales de aproximación senoidal mediante modulación por anchura de impulsos PWM.
- Control y E/S: circuitos de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación… y entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además, se incluye el interfaz de comunicaciones con buses u otros dispositivos de control y usuario.

4.3.1.1. Ventajas y desventajas de los ASD

- Ventajas
  - No tienen elementos móviles, ni contactos, como en el caso de los contactores.
  - Permite arranques suaves, sin transiciones o saltos.
  - Posibilidad de ajustar en tiempo la rampa de aceleración del motor.
  - Ahorrar energía cuando el motor funciona parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia.
  - Detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida del equipo.

- Mejor rendimiento del motor.
- El equipo no tiene limitación en cuanto al número de arranques, como sucede con la vida de los contactos.

- Desventajas
  - Limitación de la corriente de arranque.
  - Limitación en el par de arranque.

4.3.1.2. Funciones de los ASD

Las principales son:

- Arranque y regulación de velocidad, frenado de desaceleración y frenado de parada.
- Ahorro de energía.
- Regulador PI – PID (caudal, presión.).
- Recuperación automática con selección de velocidad.
- Velocidades preseleccionadas, marcha paso a paso.

4.3.1.3. Criterios para la elección del ASD

Según IEEE 3004.8-2016 para elegir el ASD más adecuado, se necesita conocer:

- La tensión de alimentación del motor
- La potencia del motor
- Aplicación es severa (mucho par de arranque), o estándar

- Las peculiaridades de control (si se desea control a distancia, o introducir los parámetros directamente sobre el variador).

Otro aspecto importante es considerar el tipo de carga que tendrá el motor, a continuación, una tabla con las principales cargas típicas de la industria.

Tabla X. **Principales cargas para motores**

Torque constante	**Extrusoras, trefiladoras, compresores y bandas transportadoras**
Torque lineal	Prensas y calandras
Torque cuadratico	Bombas centrifugas y ventiladores
Torque hiperbolico	Maquinas bobinadoras y desembobinadoras
Torque indefinido	Mesas alimentadoras

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

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).

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 equipos auxiliares, aumento de la disponibilidad del personal de mantenimiento.

Las razones para la habilitación del equipo lo cual implica una modernización de componentes y también una migración de tecnología, van enfocadas a aumentar la productividad de la planta en el sector de los empaques flexibles para alimentos. Además de esto, se esperan tener reducciones en temas de mantenimiento y en el coste de utilización de energía eléctrica.

A continuación, se evidencian los Diagramas Eléctricos diseñados y la instalación definitiva.

4.3.1.4. Variador de Frecuencia. (ASD)

De acuerdo con IEEE STD 3004.8-2016, para elegir el variador de velocidad más adecuado, se necesita conocer:

- Características de carga.
- Datos de la placa de identificación del motor.
- Consideraciones sobre el rango de control de velocidad del motor, la calefacción y el rendimiento.
- Requisitos de par.
- Requisitos de aceleración / desaceleración de carga.
- Entorno (temperatura, altitud, humedad)
- Multimotor o monomotor.

Otros aspectos importantes son el sistema de potencia (voltaje, armónicos, corriente de cortocircuito), la Tabla NEC (código electrónico nacional) u otros requisitos del código y las Consideraciones de aplicación (longitud y configuración del cable del motor).

Se va dando respuesta a cada uno de los incisos anteriores para obtener toda la información necesaria para la elección del ASD más adecuado.

- Características de carga: La carga será una extrusora la cual se caracteriza por ser una carga de par constante. Para este tipo de cargas el dispositivo de arranque debe posibilitar un gran torque de arranque para superar la fricción estática y acelerar la maquina (inercia). (El detalle de los tipos de carga se ven en el apartado de motores)
- En este caso, como el torque no depende de la velocidad, la potencia que el motor exige para su operación varia de forma proporcional con la velocidad de la carga. La estrategia más ampliamente utilizada para control de velocidad, en este tipo de motores, es el variador de frecuencia ASD.
- Datos de la placa de identificación del motor.
- Los datos de identificación del motor se pueden ver en la tabla 12
- Consideraciones sobre el rango de control de velocidad del motor, la calefacción y el rendimiento.
- El rango de control de velocidad se realizará conforme a la curva de par constante, este motor no tiene componentes de calefacción, en cuanto al rendimiento según el modelo de motor elegido indica que tiene un 95%.
- Requisitos de par.
- De la tabla 12, se sabe que el par requerido es 988 N-m.
- Requisitos de aceleración / desaceleración de carga.

Los tiempos de aceleración y desaceleración se realizarán de acuerdo con las pruebas realizadas en la máquina y tomando en cuenta las recomendaciones del manual del variador.

- Entorno (temperatura, altitud, humedad): el ambiente no es agresivo dado que está dentro de una planta de producción donde la temperatura no supera los 40 °C y la altitud sobre el nivel del mar es de 1,400 mt.
- Multimotor o monomotor: solo será un motor el cual será controlada por el ASD.

Sistema de potencia (voltaje, armónicos, corriente de cortocircuito); NEC u otros requisitos del código; Consideraciones de aplicación (longitud y configuración del cable del motor).

Para estos últimos tres puntos se basaron las recomendaciones que el fabricante del ASD proporcione.

Con los puntos anteriores aclarados, se selecciona el ASD más adecuado, para esto se realizó un sondeo en el mercado nacional para verificar cuales son los ASD en plaza y con entrega inmediata, además de esto también se consideró el factor económico. De este sondeo se determinó que el Variador más económico y con las características necesarias en un Mitsubishi de la serie FR-F800.

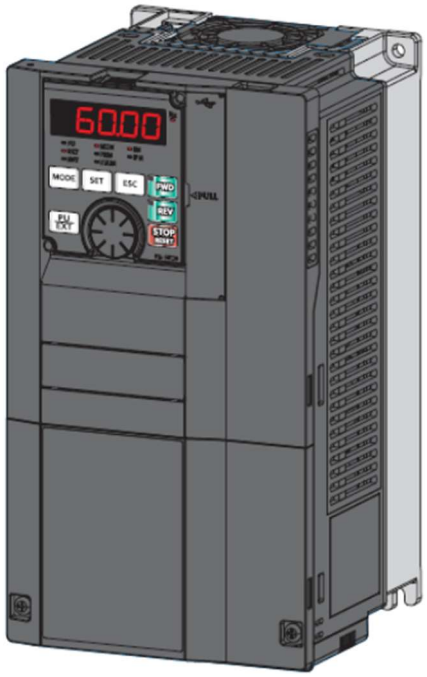
Según las especificaciones del fabricante, esta serie de variadores de frecuencia cubren un rango amplio de aplicaciones dentro de las cuales está la aplicación estándar o par constante que es la que se necesita. El modelo específico del variador de frecuencia seleccionado es el FR-840-04320 185K.

Tabla XI. **Modelo de ASD Mitsubishi**

Referencia	Potencia Nominal		Máxima corriente permantente	Alto x Ancho x Profundidad
No. Parte	HP	kW	Amp	mm
FR-840-04320 185K	245	185	430	498 x 1010 x 380

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 50. **Variador Mitsubishi serie F800**



Fuente: Mitsubishi Electric. (2014). *Instruction Manual FR-F800*. Consultado en febrero 2022. Recuperado de Instruction Manual FR-F800.

4.4. Diagramas eléctricos

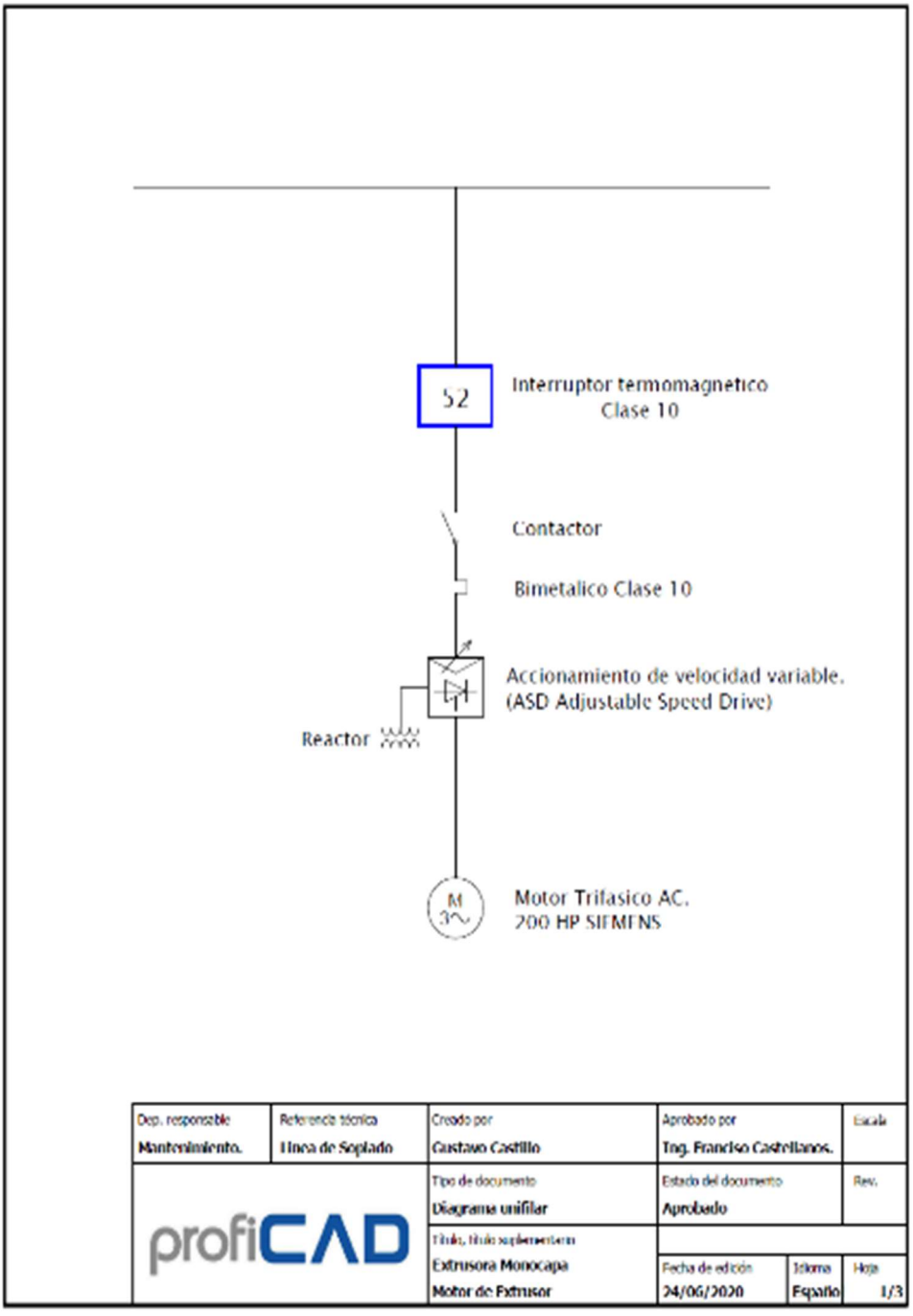
- Diagramas unifilares.
- Diagrama de potencia.

- Diagramas de control.

4.4.1. Diagramas unifilares

Diagrama unifilar: propuesta de nueva instalación con motor AC de 250 HP. (Interruptor termomagnético Clase 10, contactor, ASD (Adjustable Speed Drive) accionamiento de velocidad variable, reactor para reducción de armónicos y motor de AC de 250 HP.

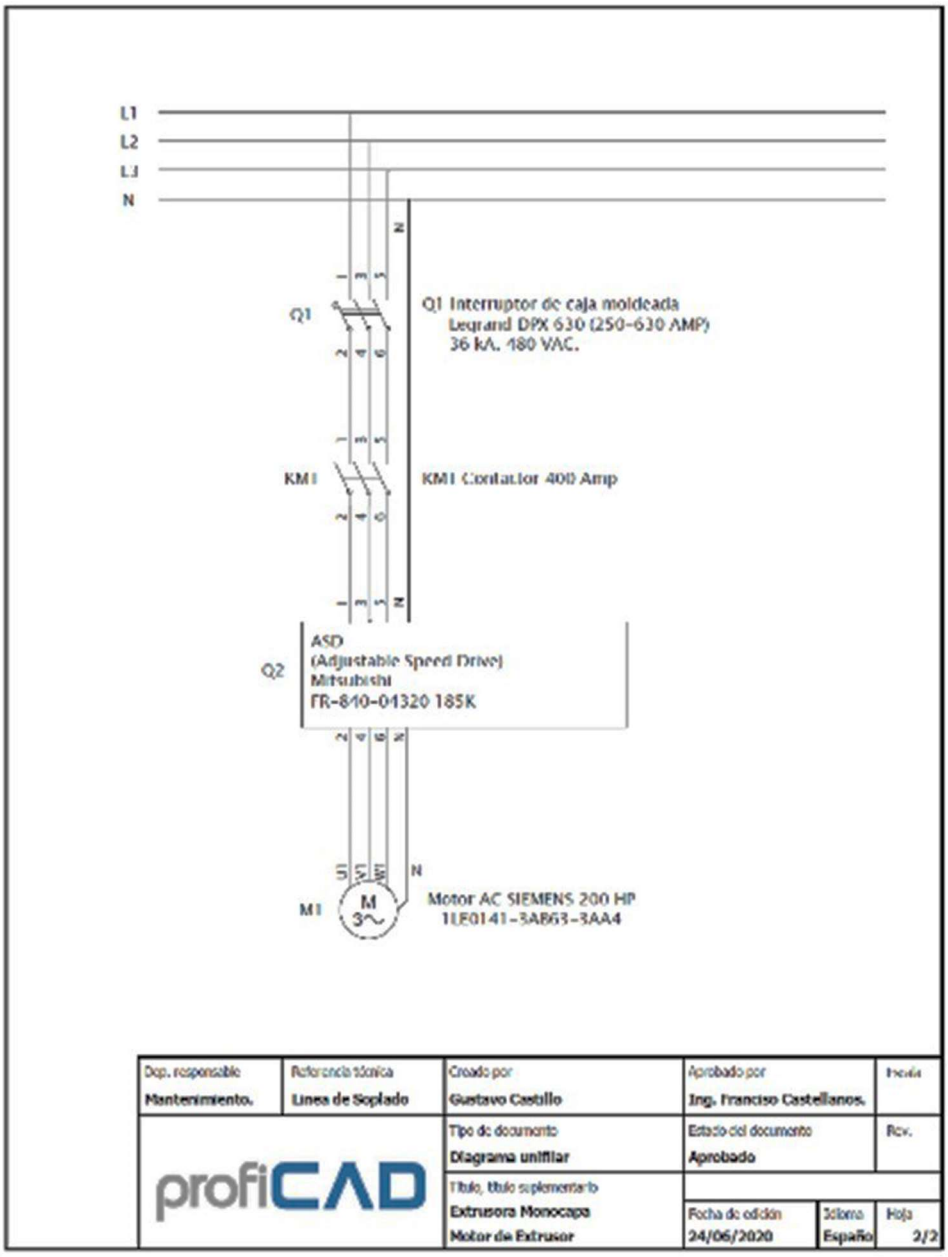
Figura 51. **Diagrama unifilar motor AC 250 HP**



Fuente: propia, elaborado con Microsoft Visio.

Diagrama de potencia de instalación con motor de AC de 250 HP, con los nuevos dispositivos de protección y variación de velocidad.

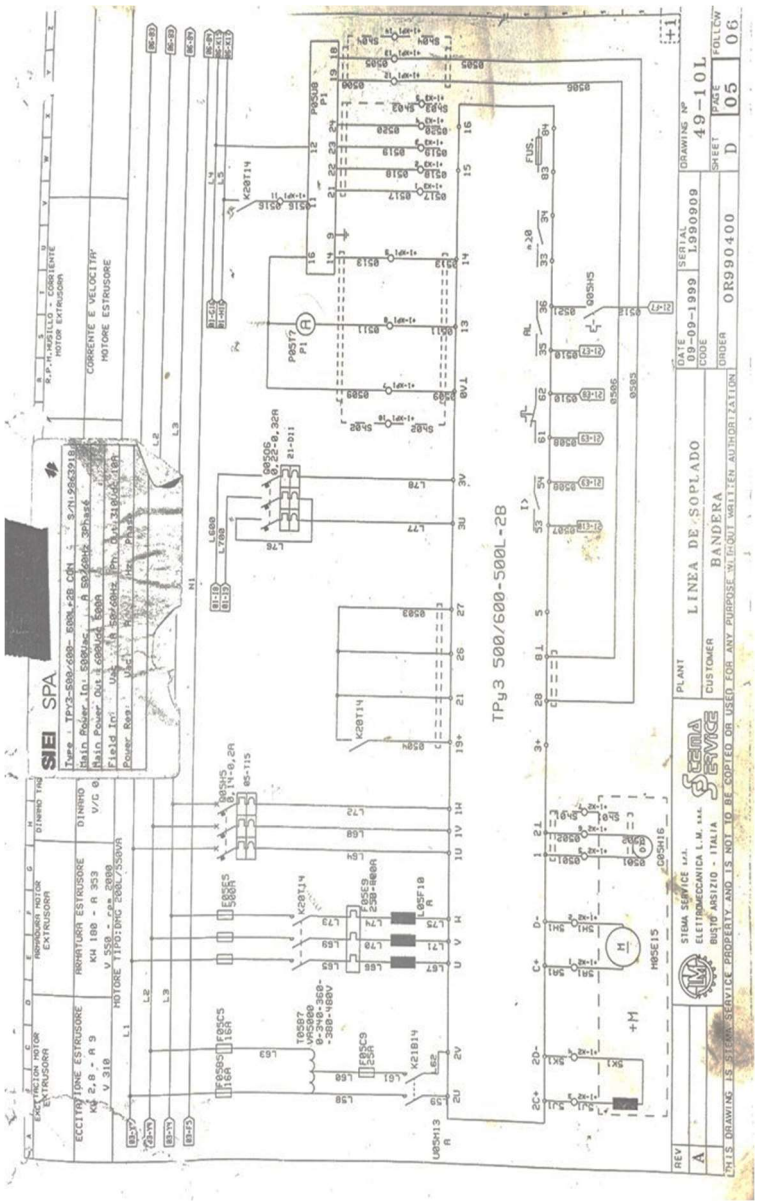
Figura 52. **Diagrama de potencia motor**



Fuente: elaboración propia, realizado con profi-CAD.

4.4.2. Diagramas de potencia y control

Figura 53. **Diagrama de potencia y control motor DC**



Fuente: Bandera L. (2000). *Esquemas eléctricos*. Recuperado de Manual de instrucciones Luigi Bandera Volumen 1.

4.5. Programación de variador de velocidad (ASD)

El sistema debe mantener la presión constante de salida en el extrusor esto para asegurar que el espesor de película y los kg/h de salida se mantengan también constantes, por tal razón fue necesario configurar el ASD para que, por medio de la regulación de velocidad por medio de entrada analógica de 4 a 20 mA, realice el ajuste de revoluciones del motor para que en el extrusor la presión del material fundido se mantenga constante.

A continuación, en la figura 48 se plantea el Grafcet del sistema en modo automático el cual cumple con las siguientes etapas.

- Etapa “0”: acá las RPM del motor y los kg/h de salida del extrusor se mantienen en “0”.

- Transición START=1: cuando el operador oprime el botón de arranque se emite una señal digital la cual da inicio al sistema.

- Etapa “1”: arranca el motor y las RPM aumentan al igual que los kg/h.

- Transición SP ⇧: el sensor de presión detecta que la presión dentro del extrusor está aumentando a causa del movimiento generado por el motor en el tornillo.

- Etapa “2”: con las condiciones anteriores el sistema debe de tomar una decisión por lo cual llega a un direccionamiento donde dependiendo del valor medido por el Sensor de Presión, el control de presión seguirá aumentado las RPM o las mantendrá estables de acuerdo al valor de presión programado.

- Transición SP < el valor programado: si el control de presión detecta por medio del sensor de presión un valor menor al programado dará paso a la etapa “1”, donde el control de presión aumentará la señal de corriente de salida (4 a 10 mA) consiguiendo con esto que las RPM del motor aumenten para aumentar la presión en el extrusor.

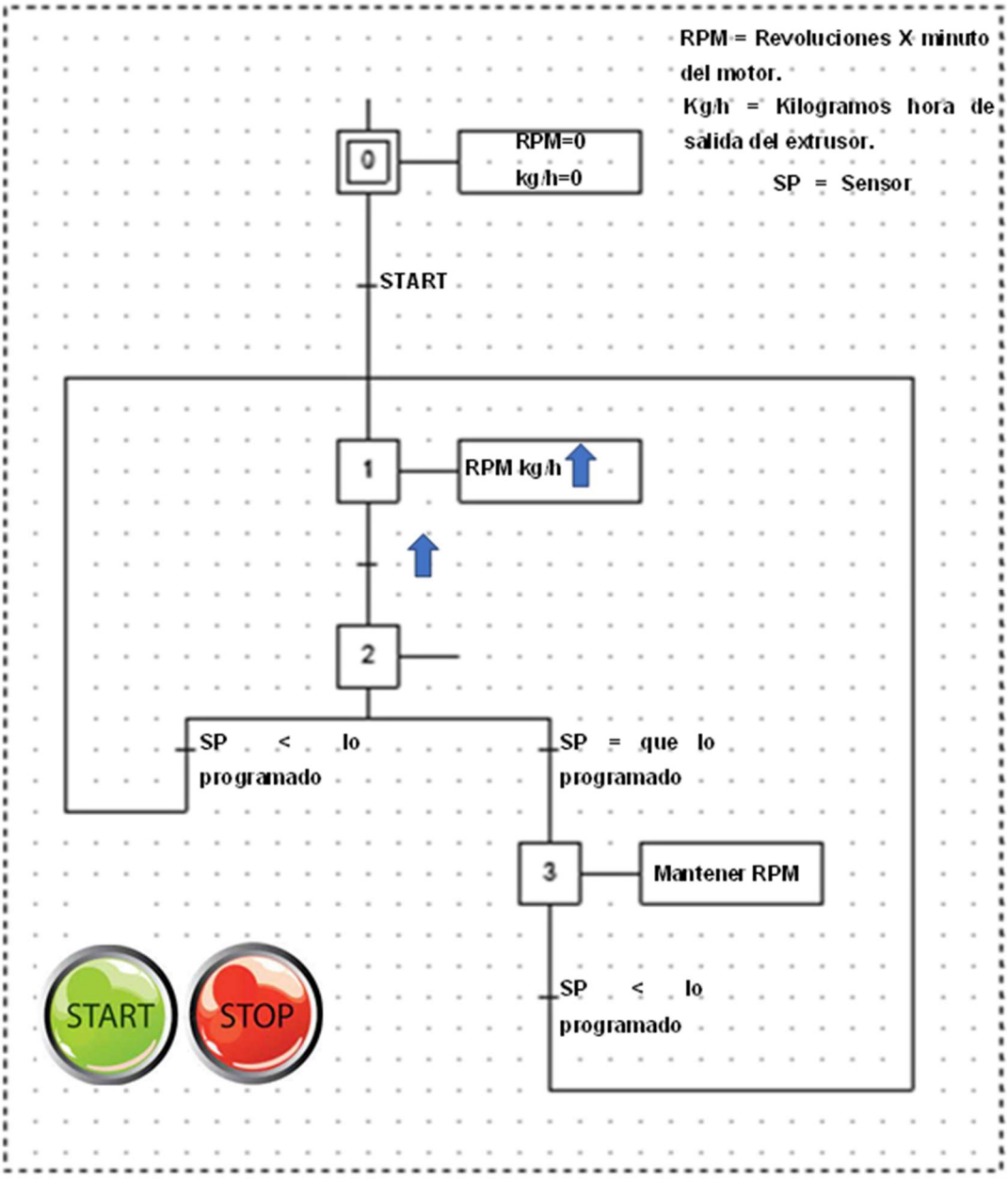
- Transición SP = al valor programado: esta etapa se da cuando el control de presión detecta por medio del sensor de presión un valor igual al programado da paso a la Etapa “3”.

- Etapa “3”: cuando se cumple la transición (SP = al valor programado), el control de presión mantiene estable la salida de corriente alcanzada y con esto se mantienen constantes las RPM dado lugar a la estabilización de la presión y los kg/h de salida del extrusor.

- Transición SP < el valor programado: para que la Etapa “3” cambie se debe de cumplir esta transición, la cual se da cuando el sensor de presión le indica al control de presión que el valor actual es menor que el valor programado y con esto detiene la Etapa “3” y da inicio nuevamente la Etapa “1”.

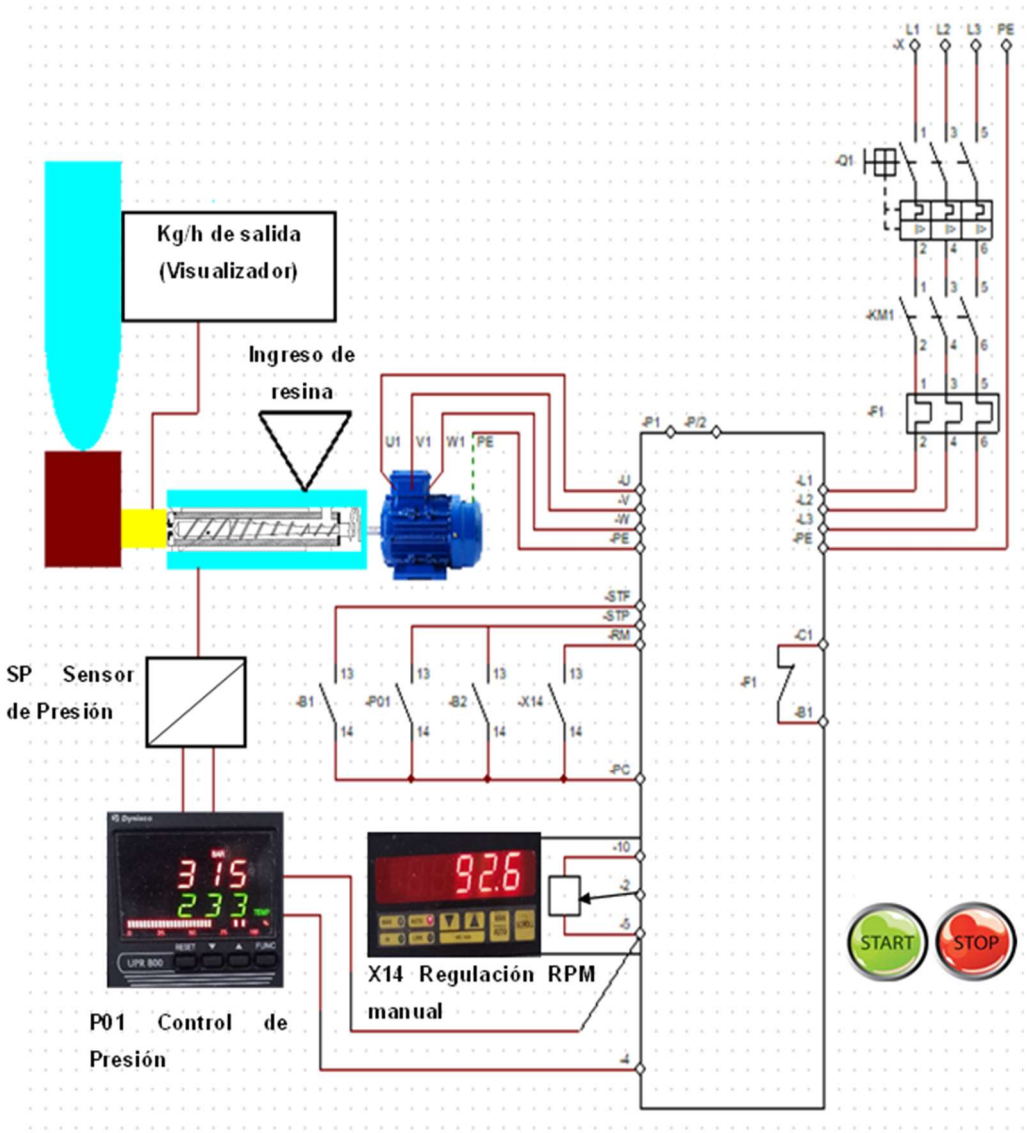
- Etapa “0”: todo este proceso vuele a la Etapa “0” cuando el operador oprime el botón de Stop del sistema.

Figura 54. **Grafcet proceso de extrusión**



Fuente: elaboración propia, realizado con CadiSimu.

Figura 55. **Diagrama control y potencia**



Fuente: elaboración propia, realizado con CadiSimu.

En la figura 55 se aprecia que el valor nominal viene dado al ASD por los parámetros del Control de Presión. El ASD recibe el valor real en forma de señal analógica de 4 a 10 mA a través del borne de entrada 4. De esto se puede resumir

que la determinación del valor nominal se lleva a cabo en una variante por medio del potenciómetro electrónico del regulador de RPM en modo manual y una segunda variante por medio de parámetros proveniente del Control de Presión en modo automático.

En función de la diferencia entre el valor nominal y el real que sería la desviación de regulación, el ASD modifica su frecuencia de salida o lo que sería la magnitud de ajuste de la regulación por sí mismo y logra aproximar el valor real al nominal por medio de un aumento o una reducción del número de revoluciones del motor.

El Control de Presión (P01) de la figura 49, está fijado en un máximo de 320 BAR que corresponden a 20 mA, un mínimo de “0” BAR que corresponde a 4 mA y con salida de alarma de sobrepresión en 400 BAR, al activarse esta alarma se detiene el motor reduciendo con esto la probabilidad de falla.

La señal analógica es la que controla las revoluciones del motor cuando el Control de Presión P01 detecta por medio del Sensor de Presión una variación de esta en el extrusor.

La señal que el Control de Presión P01 emite hacia el variador para el control de revoluciones del motor corresponde a “0 RPM” para 4mA y “1800 RPM” para 20mA.

Para realizar la regulación de velocidad con entrada analógica PID, del esquema de conexiones representado en la figura 49, además de los parámetros básicos fue necesario también llevar a cabo el ajuste de los parámetros siguientes.

4.5.1. Parametrización de ASD

Tabla XII. **Parámetros de ajuste del ASD**

Parámetro	Significado	Rango de ajuste	Ajuste de fabrica	Ajuste realizado	Comentario
180	Asignación de función borne RL	0-20	0	14	liberación de la regulación PID
128	Selección de la dirección de actuación de la regulación PID	0, 10, 11, 20, 21	0	20	regulación PID
129	Valor proporcional PID	0.1-1000%, 9999	100%	0% 10	Con este ajuste la banda proporcional es un poco amplia, pero esto contribuye a que el sistema sea estable.

Continnuación tabla XII.

Parámetro	Significado	Rango de ajuste	Ajuste de fabrica	Ajuste realizado	Comentario
131	Valor límite superior para el valor real	0-100%, 9999	9999	100%	En este caso el valor de 20 mA corresponde a 320 BAR
132	Valor límite superior para el valor real	0-100%, 9999	9999	100%	En este caso el valor de 4 mA corresponde a 0 BAR
1	Frecuencia máxima de salida	0-120 Hz	60 Hz	60 Hz	Dato de placa del motor
2	Frecuencia mínima de salida	0-120 Hz	0 Hz	0 Hz	Inicio de funcionamiento
3	Curva característica V/f	0-590 Hz	50 Hz	60 Hz	Frecuencia nominal del motor obtenida de la placa de datos.

Continuación tabla XII.

Parámetro	Significado	Rango de ajuste	Ajuste de fabrica	Ajuste realizado	Comentario
7	Tiempo de aceleración	0-3600 s	5 s	15 s	Tiempo obtenido de los datos del motor
8	Tiempo de frenado	0-3600 s	10 s	20 s	Tiempo de para en caliente
9	Ajuste de corriente para la protección electrónica del motor	0-500 A	500 A	295 A	Datos de placa
79	Selección de modos de funcionamiento	0-4, 6, 7	0	3	Señal externa de inicio mediante bornes STF
19	Tensión máxima de salida	0-1000 V	999 V	480 V	Voltaje de red
20	Frecuencia de referencia para tiempos de aceleración / frenado	1-590 Hz	50 Hz	60 Hz	Frecuencia nominal de motor / placa de datos.

Continuación tabla XII.

Parámetro	Significado	Rango de ajuste	Ajuste de fabrica	Ajuste realizado	Comentario
22	Limitación de corriente	0-400 %	150%	125%	Que corresponde a 370 A. Ajuste o clasificación de sobrecarga para motores de más de 1 caballo de fuerza, datos obtenidos de Tabla NEC 430-32 (a)
80	Potencia nominal de motor	0-3600 kW	9999	185 kW	Datos del motor
81	Numero de polos del motor	2, 4, 6, 8, 10, 12	9999	4	Datos del motor

Continuación tabla XII.

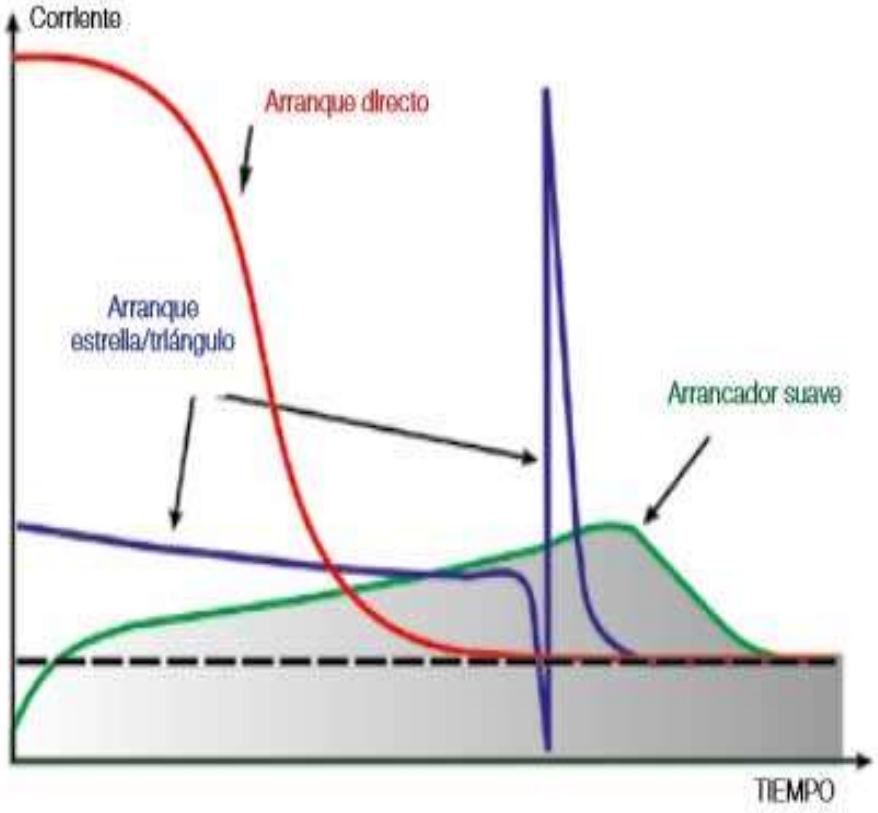
Parámetro	Significado	Rango de ajuste	Ajuste de fabrica	Ajuste realizado	Comentario
83	Tensión nominal del motor	0-1000 V	400 V	480 V	Tensión de red

Fuente: propia, datos obtenidos de manual de introductorio de ASD Mitsubishi.

4.6. Gráficas de operación de motor

El motor está conectado por medio de un ASD, que permite el arranque y parada controlada. Para lograr esto, rectifica la tensión alterna de la red, por medio de transistores IGBT´s, que trabajan en modulación de ancho de pulso, generando así una corriente trifásica de frecuencia y tensión variable, que permite la aceleración y el par de arranque del motor.

Figura 56. **Comportamiento de la corriente en el motor a diferentes métodos de arranque**



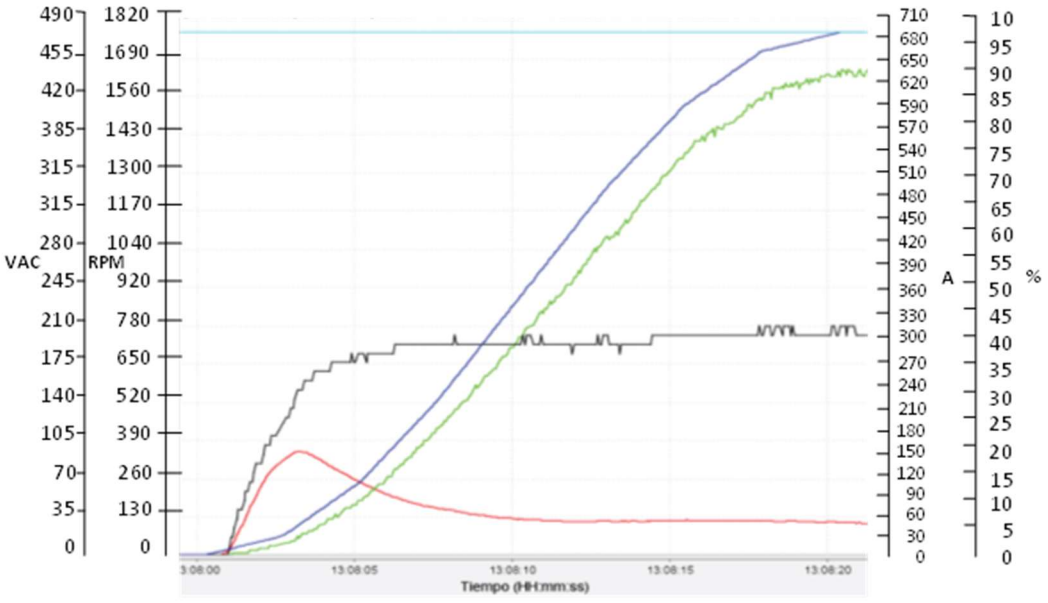
Fuente: Iguren. (2017). *Cómo Funciona Un Arrancador Suave*. Consultado en febrero 2022. Recuperado de https://iguren.es/blog/como-funciona-un-arrancador-suave/ (Iguren, 2017)

En la figura 56 se identifica claramente la ventaja que representa el arranque de y operación de motores con variador, comparado con los otros métodos, ya que los demás presentan picos de arranque, que generan sobre esfuerzos en los conductores y exige un mayor par de arranque en el motor, que se traducen en la red, en perturbaciones y caídas de tensión; en el proceso, en golpes y desgastes mecánicos; y en el motor, en calentamiento y desgaste prematuro de los acoplamientos.

En el caso de estudio si el motor se arrancara con alguno de los métodos de la figura 56, a excepción del método por ASD, la corriente de arranque según datos del motor SIEMENS de 185kW sería de 8.5 x corriente nominal lo que sería igual a 2508 A, provocando así todos los inconvenientes anteriormente planteados.

4.6.1. Gráfica de arranque y operación de motor de 185kW

Figura 57. **Arranque y operación de motor durante los primeros 20 segundos de funcionamiento.**



Fuente: fuente propia, realizado con Microsoft Excel.

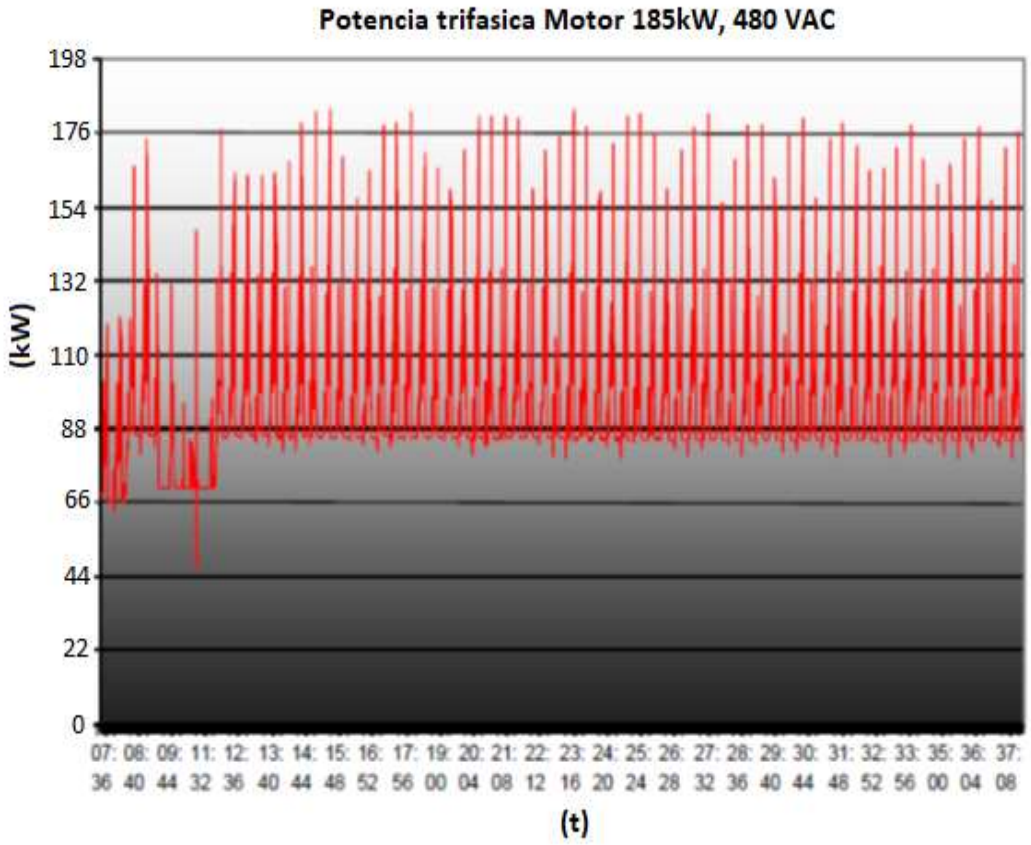
En la figura 57 se muestra la grafica acá, se aprecia que el motor alcanza su corriente de operación aproximadamente a la mitad del voltaje y velocidad de este, segundos después que de que el torque empieza a descender de su punto

más alto. También es evidente que la corriente en ningún momento excede la corriente nominal durante el arranque, sino que describe una curva suave hasta alcanzar la corriente y velocidad nominal.

Las gráficas anteriores demuestran que un ASD es el método más efectivo para el arranque y operación de los motores eléctricos, pues no presentan sobre picos de corriente lo que contribuye a que no se generen perturbaciones en la RED. También los arranques se pueden realizar de forma controlada, evitando golpes y desgates prematuros en los componentes mecánicos.

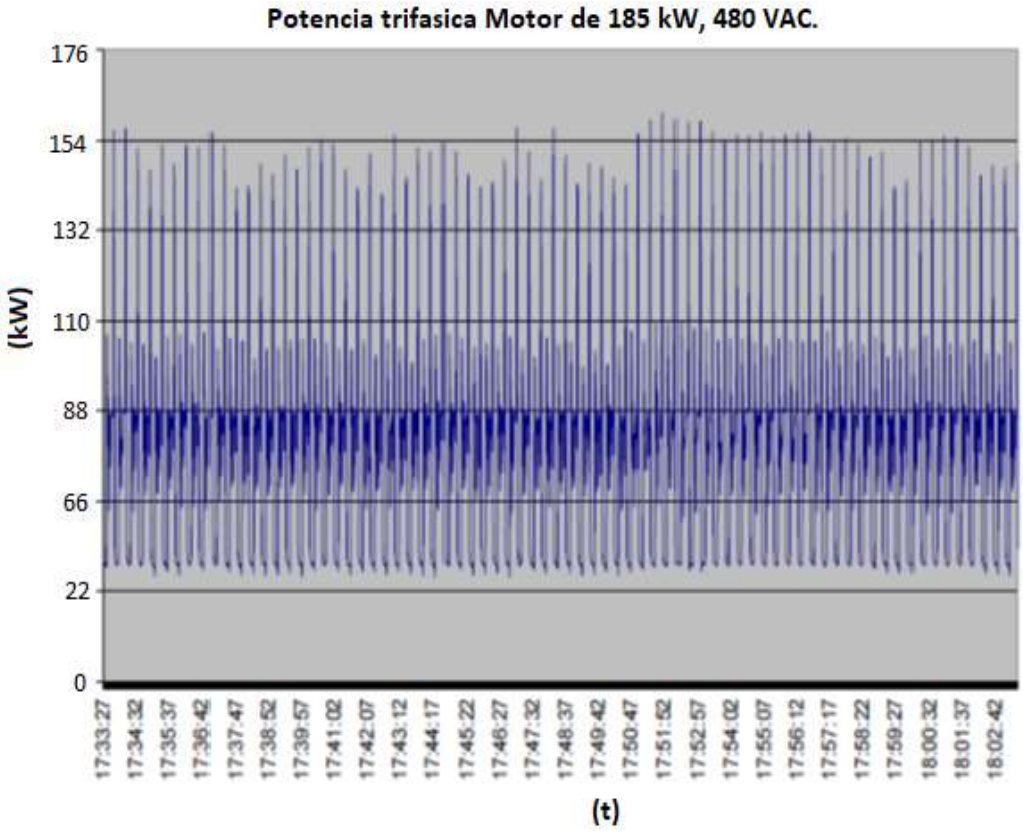
A continuación, se presentan los gráficos para el motor de 185kW trabajando sin ASD y con el ASD instalado y trabajando de forma normar en la extrusora monocapa.

Figura 58. **Potencia eléctrica sin ASD**



Fuente: elaboración propia, realizado con melshort.

Figura 59. **Potencia eléctrica con ASD**



Fuente: elaboración propia, realizado con melshort.

De los gráficos anteriores se puede notar que existe una reducción de potencia con el uso del ASD, en promedio 22 kW de reducción.

Como se puede apreciar el uso de un ASD puede reportar ahorros de energía y en el caso de estudio particular un ahorro de 22kW.

4.7. Mantenimiento de ariador Mitsubishi Serie FR-800

Figura 60. **Mantenimiento de ariador Mitsubishi**

	El mantenimiento debe ser efectuado exclusivamente por operadores expertos y en conformidad con las normas vigentes en materia de seguridad laboral y medioambiental. No desechar en el medio ambiente líquidos contaminantes, piezas sustituidas ni residuos de las operaciones de mantenimiento. ¡Nunca efectuar reparaciones improvisadas!
	Antes de intervenir en el grupo, desactivar la alimentación de este, tomando precauciones ante la reactivación involuntaria, y, en cualquier caso, ante la movilidad de las partes de dicho grupo, esperar que el grupo haya alcanzado la temperatura ambiente. Informar al personal que opera y al que se encuentra en las cercanías, señalando adecuadamente las zonas cercanas e impidiéndoles el acceso.

Fuente: SIMOTIC. (2019). *Portafolio de motores*.

Este apartado explica las tareas de inspección y mantenimiento para el Variador de velocidad (ASD) FR-840-04320 185K.

Es importante comprender que se debe realizar una inspección diaria para evitar cualquier que alguna falla ocurra debido a los efectos adversos del entorno

operativo, como la temperatura, la humedad, el polvo, la suciedad y vibración, cambios en las piezas con el tiempo, vida útil y otros factores.

4.7.1.1.1. Inspección diaria

Verificar si las siguientes fallas ocurren durante la operación.

- Fallo de funcionamiento del motor.
- Entorno de instalación inadecuado.
- Fallo del sistema de refrigeración.
- Vibración anormal, ruido anormal.
- Sobrecalentamiento anormal, decoloración.

4.7.1.1.2. Inspección periódica

Verificar que las áreas estén inaccesibles durante la operación con el fin de poder realizar las siguientes inspecciones periódicas.

- Revisar y limpiar el sistema de refrigeración. (Limpie el filtro de aire, y demás componentes del sistema de refrigeración).
- Comprobar el apriete y volver a apretar. (Los tornillos y pernos pueden aflojarse debido a la vibración, la temperatura, cambios en la operación, entre otros. Revíselos y apriételos)
- Comprobar los conductores y los materiales aislantes en busca de corrosión y daños.

4.7.2. Inspecciones diarias y anuales

Tabla XIII. **Mantenimiento de ASD**

Área de inspección	Componente para inspeccionar	Descripción	Intervalo de inspección		Acción correctiva
			Diario	Anual	
	Ambiente	Comprobar temperatura del aire circundante, humedad, suciedad, neblina de aceite entre otros		X	Mejorar el ambiente.
General	Unidad ASD	Compruebe si hay vibraciones o ruidos		X	Comprobar ubicación de la falla y aprete
		Compruebe si hay suciedad, aceite y otros materiales extraños		X	Limpiar

Continuación tabla XIII.

Área de inspección	Componente para inspeccionar	Descripción	Intervalo de inspección		Acción correctiva
			Diario	Anual	
	Fuente de alimentación Voltaje	Compruebe que los voltajes del circuito principal y control	X		Inspeccionar el Voltaje de suministro
Circuito principal	General	(1) Verifique con mega óhmetro (a través de las terminales del circuito principal y tierra (tierra) terminal). (2) Compruebe si hay tornillos y pernos sueltos. (3) Compruebe si hay rastros de sobrecalentamiento en las piezas. (4) Compruebe si hay manchas		X	

Continuación tabla XIII.

Área de inspección	Componente para inspeccionar	Descripción	Intervalo de inspección		Acción correctiva
			Diario	Anual	
Circuito principal	Conductores	Verifique que el aislamiento de los cables no esté roto y deteriorado		X	Reemplace los conductores
	Reactor	Compruebe si hay olores inusuales y un aumento anormal de sonido.	X		Reemplace si es necesario.
	Bloque de terminales	Compruebe si hay daños		X	Detener el equipo verificar torque de bornes y/o sustituir
	Relé	Comprobar que el funcionamiento es normal y no se escuchan ruidos extraños		X	Reemplace el contactor su tiene problemas

Continuación tabla XIII.

Área de inspección	Componente para inspeccionar	Descripción	Intervalo de inspección		Acción correctiva
			Diario	Anual	
Circuito de control, circuito de protección	Comprobar funcionama-miento	Verifique que los voltajes de salida entre las fases sean equilibrado mientras opera el inversor.		X	Póngase en contacto con el fabricante.
	Condensador electrolítico de aluminio	Compruebe si hay fugas de líquido en un condensador y rastro de deformación.		X	Reemplace los condensado-res
Sistema de enfriamien-to	Ventilador	Compruebe si hay vibraciones y ruidos inusuales.	X		Reemplace el ventilador
	Disipador de calor	Compruebe si hay obstrucciones		X	Limpiar

Continuación tabla XIII.

Área de inspección	Componente para inspeccionar	Descripción	Intervalo de inspección		Acción correctiva
			Diario	Anual	
Pantalla	Indicación	Compruebe si hay manchas		X	Limpiar
	Medidor	Verifique que la lectura sea normal		X	Detener el equipo y póngase en contacto con el fabricante
Carga	Comprobación del funcionamiento del motor	Compruebe si hay vibraciones y un aumento anormal de ruido de funciona-miento		X	Detener el equipo y revisar el motor

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de manual de introductorio de ASD Mitsubishi.

A continuación, se evidencian las fotos del motor instalado.

En la figura 60, se aparecía la forma en que fue realizada la instalación del nuevo motor, la forma de trasladar la potencia es por medio de fajas.

Figura 61. **Motor de 250 HP Siemens instalado**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 62. **Motor de 250 HP Siemens instalado**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 63. **Motor de 250 HP Siemens instalado**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Figura 64. **Gabinete eléctrico nuevo**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

En la figura 64, se aprecia el gabinete donde se instaló el nuevo variador con el filtro de armónicos.

Figura 65. **Gabinete eléctrico de nuevos dispositivos**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

En la figura 64, se aprecia el interior del gabinete con todos los dispositivos eléctricos de la nueva instalación.

Figura 66. **Gabinete eléctrico con interruptor de caja moldeada**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

En la figura 65, se aprecia el gabinete principal donde se instaló el interruptor de caja moldeada y el contactor para la nueva instalación.

Figura 67. **Motor instalado y trabajando**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

En las figura 66, se aprecia la extrusora trabajando con el nuevo motor y variador de velocidad trabajando sin problemas.

Figura 68. **Extrusora trabajando sin problemas**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

4.8. Línea de extrusión monocapa

Aumento de la disponibilidad de la línea de extrusión monocapa, por medio de componentes actuales que faciliten tareas de mantenimiento y reparación.

Una vez realizado el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa, la fabricación de empaques para alimentos, lo cual aumentará las posibilidades de optimización en extrusión; ya que se contará con una maquinaria en perfecto estado, por lo cual se alcanzará un incremento de la productividad, mejoramiento de la calidad, incremento de la eficiencia, racionalización del consumo de materia prima, reducción del desperdicio, reducción de tiempos perdidos; calificación y educación de la mano de obra.

Desde el punto de vista de equipos, para la la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A., lo anterior se logra con la adición o adecuación de una serie de componentes auxiliares o módulos de proceso que incluyen:

- Husillos de barrera, mezcladores y de alto rendimiento.
- Control y monitoreo en línea de todos los parámetros de proceso y condiciones de operación: temperaturas, presiones, velocidades, dimensiones, entre otros.
- Control de espesores por alguno de los siguientes métodos: nucleares, láser, capacitivos, ultrasónicos, infrarrojos o calibradores de aire
- Suficiente capacidad de enfriamiento.
- Sistemas de transporte neumático y dosificación de las materias primas
- Sistemas de reciclaje en línea de recortes o refiles.

Con respecto al capital humano, este se debe calificar, entrenar y educar en base a la optimización del proceso de extrusión así lo requiere. La capacitación mínima para operarios y supervisores deben tener conocimiento de matemáticas básicas, estadística, manejo de computadores, buen uso de software, control de calidad en la fuente, materiales plásticos, extrusión de plástico y conocimientos específicos y detallados de maquinaria y equipo.

Se debe implantar un sistema que permita visualizar, controlar y optimizar el proceso de extrusión que posee una arquitectura de red y está conformado por 4 niveles, de nivel inferior a superior: Control del Proceso, Análisis del Proceso y del Producto, Red de la Planta y Planeación de recursos materiales y requerimientos.

El primer nivel, Control del Proceso, controla la línea de extrusión con terminales que manejan todos los parámetros y condiciones de operación, tales como, recetas, tiempos, temperaturas, presión, velocidades, dimensiones, alarmas, mímicos de control, etc.

En el segundo nivel, Análisis del proceso y del producto, se generan reportes completos a partir de la captación de datos del proceso, por ejemplo, gráficos de tendencia, cartas de control, indicadores estadísticos, análisis en tiempo real, comparaciones con datos de corridas anteriores (Real vs. Histórico), etcétera.

En el tercer nivel, Red de la planta, se adicionan a los reportes completos del proceso, los reportes de calidad, de mantenimiento y programación de la producción, para así pasar a un cuarto nivel y última instancia, Planeación de recursos materiales y requerimientos. Es importante aclarar que se necesita un

sistema de control de línea completo (es decir, una terminal) para controlar una línea de extrusión.

En la gran mayoría de los casos de optimización de procesos de extrusión debe ser asistido por un especialista para ver los resultados en forma inmediata.

4.9. Disminución de costo de adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica

Para disminuir los costos costo de: adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica de la empresa INGRUP Central de Empaques, S.A. para la fabricación de empaques para alimentos, se procedió a la inversión en equipos para producir empaques para alimentos de calidad; los cuales se fundamentaron en el reemplazo de motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, por un motor y variador de velocidades de AC y readecuación de circuitos de control para línea de extrusión monocapa.

Con esta alternativa la empresa INGRUP Central de Empaques, S.A. se pueden ahorrar miles de dólares al cambiar motores trifásicos de DC a AC. Los motores AC ahora posee la mayor parte de la cuota de mercado, lo que reduce los costos. Adicionalmente, los variadores de frecuencia de AC requeridos ofrecen un control completo sobre la velocidad y el consumo de energía de un motor AC. En este sentido, la combinación de un motor AC y una unidad de variador de frecuencia resulta ser la solución más rentable para INGRUP Central de Empaques, S.A.

4.9.1. Calcular ahorro energético a lograr con el reemplazo

Para el análisis financiero se tomarán como base los datos de consumo, precio de kWh, y costo de energía eléctrica el año 2018 realizando, en este caso, la comparación entre el cambio de tecnología. La máquina cuenta con un medidor de energía Schneider Electric ION6200 (figura 57), del cual cada mes se extraen los datos para alimentar un archivo de Excel (tabla 13), de la misma forma también se cuanta con el dato de horas trabajadas por mes de la máquina. Los datos del precio del kWh por mes fueron extraídos de la información proporcionada por la comercializadora de energía eléctrica. El consumo de energía eléctrica de la Extrusora Monocapa será monitoreado a través de un medidor de energía marca Schneider Electric.

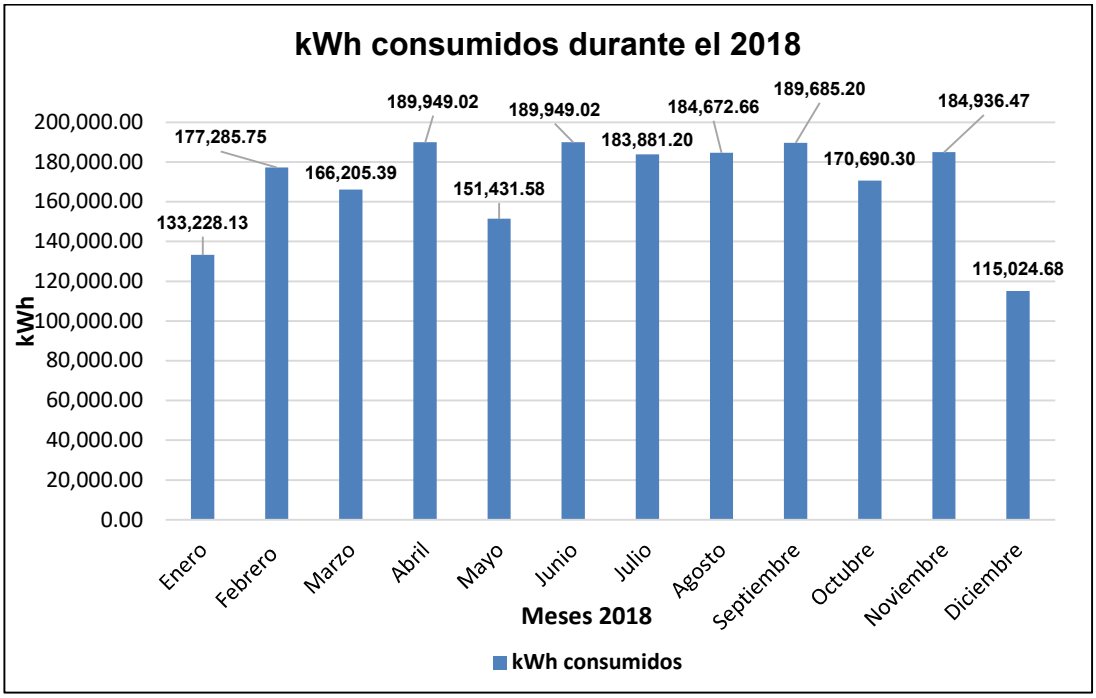
Figura 69. **Medidor de energía**

Fuente: [Fotografía de Gustavo Castillo]. (Planta de producción, Guatemala. 2021). Colección particular. Guatemala.

Los datos de energía eléctrica que se toman del medidor de energía están bajo las mismas condiciones es decir la misma capacidad de salida del cabezal (220 kg/h), presión del cabezal (298-300 BAR), temperatura del cabezal (243°C)

y 119 RPM del extrusor, con estos datos de proceso se produce lamina de termoencogible que en su formulación tiene polietileno de baja densidad y polietileno lineal.

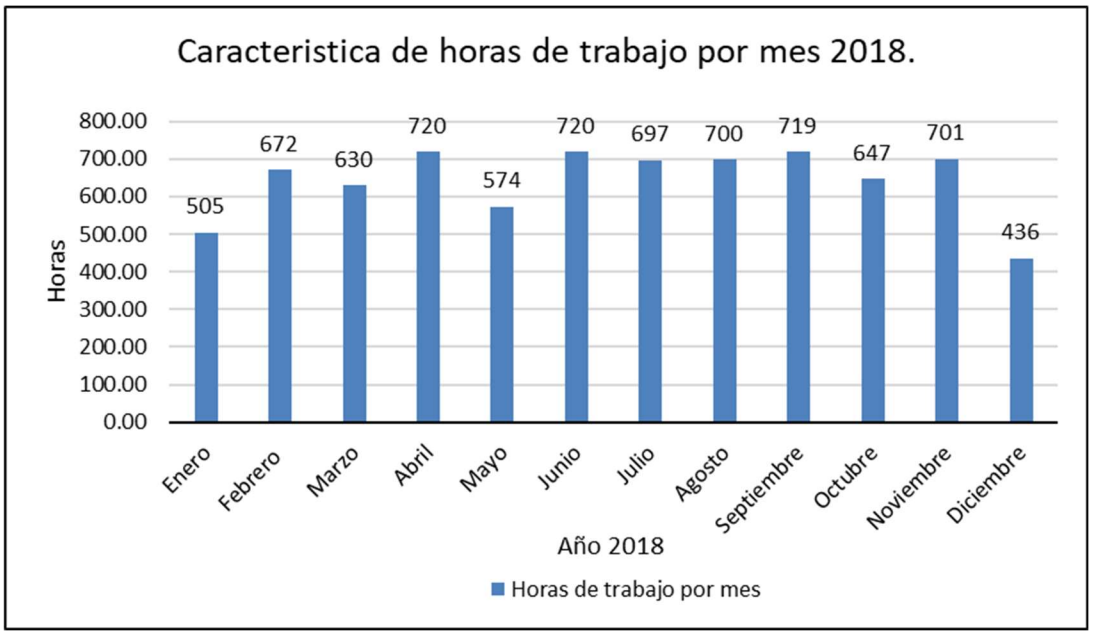
Figura 70. **Característica kWh consumidos en 2018**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En la figura 70 se, de muestra las horas de trabajo por mes que el motor y variador DC tuvieron en el año 2018, esta información se extrae del horómetro que está instalado en la máquina. En el caso de los meses de 30 días, las horas disponibles de trabajo son 720 y en el caso de los meses de 31 días son 744. Los meses en que la maquina no trabajo el 100% de las horas disponibles se debe a mantenimientos preventivos, correctivos y trabajos de limpieza por parte de producción.

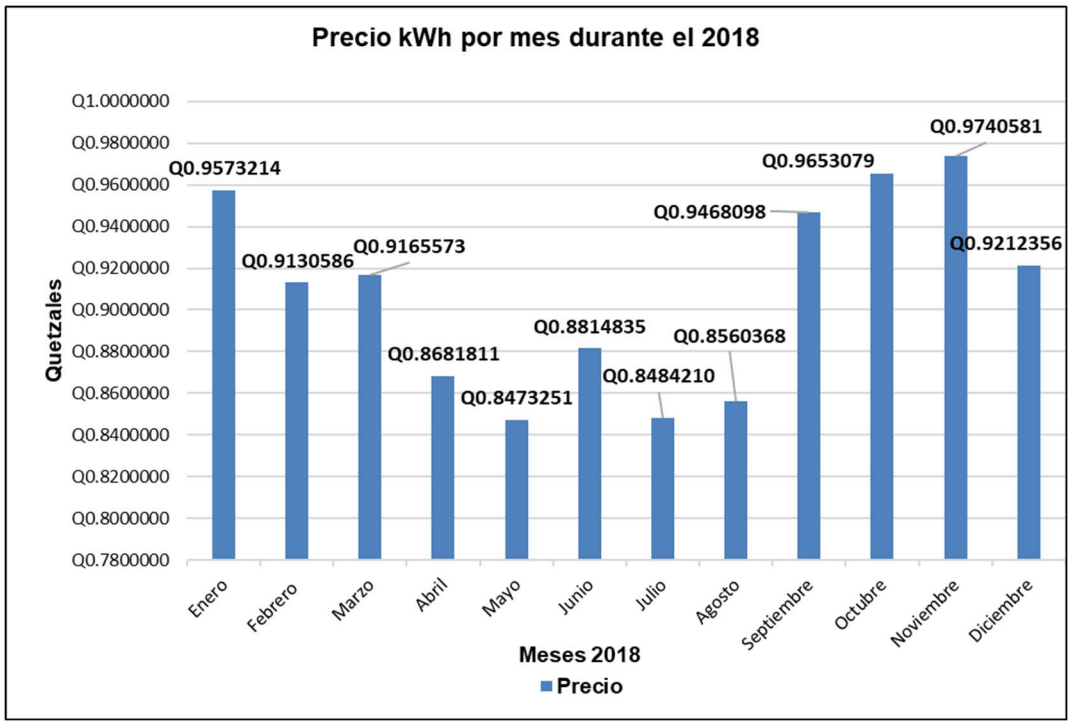
Figura 71. **Característica de horas de trabajo por mes**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

En la figura 71, se muestra el comportamiento del precio por kWh que se obtuvo durante el año 2018.

Figura 72. **Precio por kWh por mes durante el 2018**



Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.9.2. Cálculo de costo de energía eléctrica de motor y variador DC

Para el cálculo del costo de energía eléctrica con el motor y variador DC se utilizarán los datos obtenidos del medidor de energía, el precio del kWh del (Gráfico 3) y las horas de trabajo (Gráfico 2), según la siguiente ecuación.

$$Costo\ de\ EE = kWh\ utilizados * Precio\ del\ kWh\ (Q)$$

Donde:

EE = Energía Eléctrica.
kWh utilizados = energía utilizada durante cada mes.
Precio del kWh = precio del kWh de cada mes en Quetzales.
Para el mes de enero del 2018.

$$Costo\ de\ EE_{Enero} = 133{,}228.13\ kWh\ * Q\ 0.9573214$$

$$Costo\ de\ EE_{Enero} = Q\ 127{,}542.14$$

De esta forma se calcula para cada mes, en la (tabla XIV), se muestra el resultado para cada mes del año 2018. De esta tabla se puede concluir.

Consumo total de energía eléctrica anual (2018) = **2,036,939.40 kWh**
Costo de energía eléctrica anual (2018) = **Q1,846,973.50**

Tabla XIV. **Costo de energía eléctrica anual (2018)**

Mes	Precio kWh mensual (Q)	Horas de trabajo	Consumo EE en kWh (datos obtenidos de medidor de energía)	Costo EE mensual (Q)
Enero	Q0.9573214	505.00	133,228.13	Q127,542.14
Febrero	Q0.9130586	672.00	177,285.75	Q161,872.28
Marzo	Q0.9165573	630.00	166,205.39	Q152,336.76
Abril	Q0.8681811	720.00	189,949.02	Q164,910.15
Mayo	Q0.8473251	574.00	151,431.58	Q128,311.78
Junio	Q0.8814835	720.00	189,949.02	Q167,436.92
Julio	Q0.8484210	697.00	183,881.20	Q156,008.67
Agosto	Q0.8560368	700.00	184,672.66	Q158,086.59
Septiembre	Q0.9468098	719.00	189,685.20	Q179,595.81
Octubre	Q0.9653079	647.00	170,690.30	Q164,768.69
Noviembre	Q0.9740581	701.00	184,936.47	Q180,138.87
Diciembre	Q0.9212356	436.00	115,024.68	Q105,964.83
	Total, anual	**7721.00**	**2,036,939.40**	**Q1,846,973.50**

Fuente: elaboración propia, realizado con Excel.

4.9.3. Cálculo de costo de energía eléctrica motor y variador AC

Para el cálculo del costo de energía eléctrica con el nuevo motor y variador AC, se tomarán como base los datos de precio de kWh y horas de trabajo del

2018. Para la potencia eléctrica se tomarán los datos de placa del motor de la siguiente manera.

Potencia eléctrica:

$$P = (E * I * \sqrt{3} * FP)/1000$$

Donde:
P = Potencia eléctrica en kW.
E = Voltaje de alimentación AC.
I = corriente de plena carga del motor.
FP = Factor de potencia, para este caso es de 0.94.

$$P = (480 * 295 * \sqrt{3} * 0.94)/1000 = 230.54\ kW$$

Para el costo de energía eléctrica:

$$Costo\ de\ EE = Potencia\ electrica * horas\ de\ trabajo\ del\ mes * Precio\ del\ kWh\ (Q)$$

Donde:
Costo de EE = costo de energía eléctrica en quetzales.
Potencia Eléctrica = potencia eléctrica con datos de placa del motor AC.
Horas de trabajo del mes = horas de trabajo que la maquina acumulo durante el mes de cálculo (tomando como referencia los datos del 2018)
Precio del kWh = precio del kWh durante el mes de cálculo (tomando como referencia los datos del año 2018)

$$Costo\ de\ EE_{Enero} = 230.54kW * 505h * 0.9573214Q = Q\ 106{,}586.21$$

De esta forma se realizaría el cálculo para cada mes, esto con el objetivo de realizar la comparación en el mismo periodo (2018) con las diferentes tecnologías instaladas.

En la (tabla XV), se muestran los consumos y costos de energía eléctrica estimados con el nuevo motor y variador AC. De aquí se puede determinar lo siguiente:

Consumo anual de EE en kWh = 1,702,258.14
Costo anual de EE = Q1,543,504.76

Tabla XV. **Costo de energía eléctrica Motor y variador**

Mes	Precio kWh (Q) (Año 2018)	Horas de trabajo (Año 2018)	Potencia eléctrica kWh (a plena carga, de datos de placa)	Costo por EE mensual (Q)
Enero	Q0.9573214	505.00	111,337.96	Q106,586.21
Febrero	Q0.9130586	672.00	148,156.65	Q135,275.70
Marzo	Q0.9165573	630.00	138,896.86	Q127,306.93
Abril	Q0.8681811	720.00	158,739.26	Q137,814.43
Mayo	Q0.8473251	574.00	126,550.47	Q107,229.39
Junio	Q0.8814835	720.00	158,739.26	Q139,926.04
Julio	Q0.8484210	697.00	153,668.43	Q130,375.52
Agosto	Q0.8560368	700.00	154,329.84	Q132,112.02
Septiembre	Q0.9468098	719.00	158,518.79	Q150,087.15
Octubre	Q0.9653079	647.00	142,644.87	Q137,696.22
Noviembre	Q0.9740581	701.00	154,550.31	Q150,540.98
Diciembre	Q0.9212356	436.00	96,125.44	Q88,554.18
	Total, anual	**7721**	**1,702,258.14**	**Q1,543,504.76**

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

4.9.4. Relación entre las dos tecnologías

De los cálculos anteriores se puede estimar el ahorro que existirá con el cambio de tecnología de la siguiente manera.

$$Ahorro = Costo_1 - Costo_2$$

Donde:

$$Costo_1 = costo\ de\ energia\ electrica\ durante\ el\ 2018\ con\ motor\ y\ variador\ DC$$

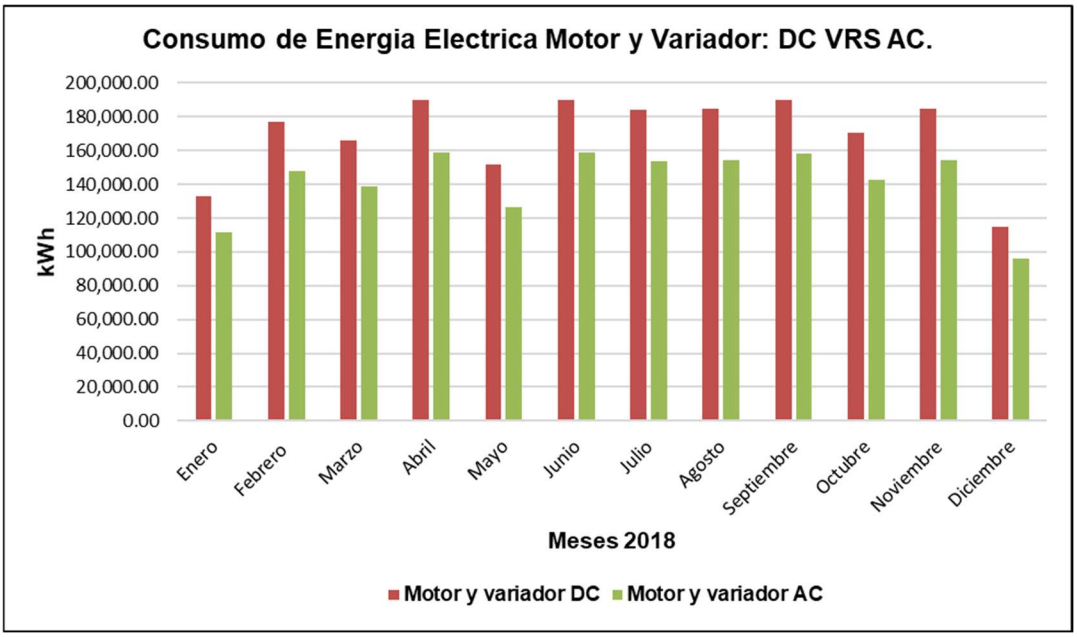
$$Costo_2 = costo\ de\ energia\ electrica\ calculado\ con\ datos\ del\ 2018\ con\ motor\ y\ \ variador\ AC$$

$$Ahorro = Q1{,}846{,}973.50 - Q1{,}543{,}504.76 = \ \ Q303{,}468.73$$

$$Ahorro\ \% = \frac{Ahorro}{Costo_1} = \frac{303{,}468.78}{1{,}846{,}973.50} = 16.43\%$$

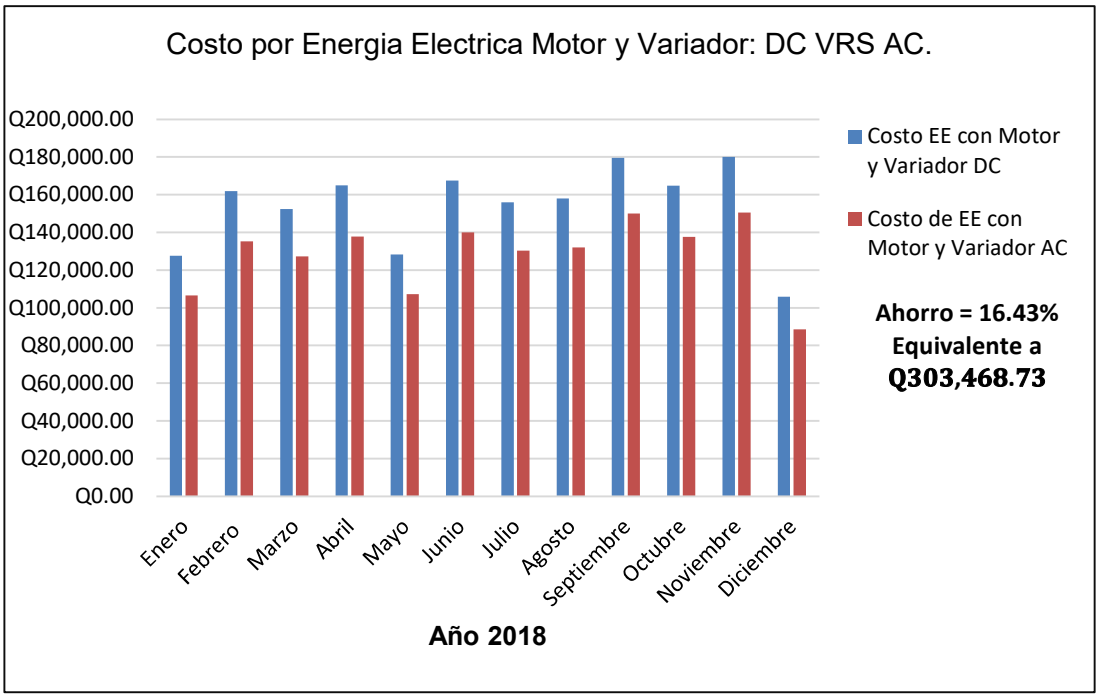
En las figuras 72 y 73 se aprecia la relación entre consumo y costo por energía eléctrica entre ambas tecnologías, es decir, motor y variador DC vrs motor y variador AC.

Figura 73. **Relación de consumo de energía eléctrica de motor y variador: DC v.s AC**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 74. **Relación de costo de energía eléctrica de motor y variador: DC v.s AC**



Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

4.9.5. Cálculo del período de recuperación de la inversión

En la tabla XVI, se tiene la inversión inicial que se debe de realizar para realizar el cambio de motor y variador. La inversión es de Q250,700.00 que corresponde a motor y variador de AC.

Tabla XVI. **Inversión inicial**

No	Descripción	Cantidad	Costo/u (Q)	Total (Q)
1	Motor de 185 kW de corriente alterna	1	144,187.74	144,187.74
2	Variador de velocidad para motor de 185 kW	1	115,000.00	115,000.00
3	Cableado y accesorios	1	25,000.00	25,000.00
5	Estructura para montaje	1	20,000.00	20,000.00
6	Protecciones eléctricas	1	15,700.00	15,700.00
			TOTAL	**319,887.74**

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Con la información de la inversión inicial ahora se calcula el periodo de recuperación de la inversión (PRI).

Tabla XVII. **Período de Recuperación de la Inversión**

Años	Inversión inicial (Q)	Costo de energía ahorrada (Q)	Acumulado (Q)
0	**319,887.74**		**-319,887.74**
1		**303,468.73**	**-16,419.01**
2		**303,468.73**	**287,049.72**

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

El periodo de recuperación de la inversión es un poco mayor a 1 año, para calcular el tiempo estimado se aplica una regla de tres simples de donde se obtiene que el periodo de recuperación es de 1.05 años.

Conclusión: después de realizar las estimaciones de ahorro de energía se calculó el tiempo de recuperación de la inversión es de 1.05 años, el cual es un tiempo relativamente corto dado el importante ahorro que se obtiene con el cambio de tecnología, por lo cual se puede afirmar que el proyecto es viable ya que la recuperación de la inversión es en un tiempo corto.

Los ASD se están volviendo cada vez más comunes y utilizados en las empresas. La instalación de ASD en INGRUP será capaz de variar la velocidad de salida de un motor sin la necesidad de poleas mecánicas, reduciendo así el número de componentes mecánicos y el mantenimiento en general. La mayor ventaja es la capacidad de ahorrar dinero para INGRUP Central de Empaques, S.A. través de su naturaleza heredada para ahorrar energía al consumir solo la energía que se necesita.

El control de velocidad para la instalación de INGRUP implica una adaptación, en todo momento, a las condiciones de carga de la instalación, adecuando los caudales y presiones a la demanda de la instalación, garantizando la máxima eficiencia y ahorro energético.

En Central de Empaques, S.A., el variador de frecuencia saca partido de las leyes de proporcionalidad (leyes de ventiladores), para lograr la principal ventaja del uso de estos equipos, que es el ahorro energético. Si se comparan con sistemas de control alternativos, un variador de frecuencia es el sistema óptimo para el control de ventiladores y bombas. Queda clara la gran eficiencia energética de estos equipos.

En cuanto a las ventajas aporta un variador de frecuencia en Central de Empaques, S.A. se tiene el gran ahorro energético, el control mejorado de caudal y presión; la corrección del factor de potencia del motor; la eliminación de la energía reactiva y arranque suave de los motores no es necesario arranques

«estrella-triángulo» en motores de gran consumo; menor mantenimiento, eliminación de ruidos por vibraciones y no se producirán cavitaciones en las bombas hidráulicas.

CONCLUSIONES

1. En cuanto al objetivo relativo a la “actualización de tecnología para la propulsión del extrusor” se concluye que la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. productora de envases de plástico ubicado en la Ciudad de Guatemala, con su equipo que disponía al momento del diagnóstico, conformado por un motor de 180 kW y variador de velocidad de DC, presentaba problemas de: (a) altos costos de mantenimiento; (b) altos costo de operación de los motores de corriente continua (CC); (c) afecta negativamente los costó de producción o costo del producto terminado; (d) envejecimiento de los dispositivos provoca una mayor recurrencia de fallas; y (e) poca disponibilidad de repuestos para equipos obsoletos de baja tecnología. Por esta razón se propone y aplica a la empresa INGRUP, Central de Empaques, S.A. como solución, la sustitución del motor y variador de velocidad de corriente directa por un motor y variador de velocidad de similar potencia en corriente alterna; mediante la cual se tiene acceso los variadores electrónicos de frecuencia en conjunto con motores de corriente alterna siendo ésta la opción de mayor avance, desarrollo y utilización.

2. En cuanto al objetivo de aumentar la disponibilidad de la línea de extrusión monocapa, por medio de componentes actuales que faciliten tareas de mantenimiento y reparación, se concluye que en definitivamente los componentes de actualización tecnológicas aumentarán la disponibilidad de la línea de extrusión un 5 % llevándola de 90 % actual a un 95 %, ya que la disponibilidad o la utilización de la línea de extrusión deberá de

incrementar porque el tiempo en mantenimientos será menor producto del cambio de tecnología de motores.

3. En cuanto al objetivo específico de “disminuir el costo de: adquisición, instalación mantenimiento y energía eléctrica”; se concluye: que ciertamente con el cambio de tecnología, los costos se reducen dado que realizar mantenimiento a un motor de AC es más económico que realizarlo a un motor de DC. Por otra parte, también se espera tener reducción de costos por consumo de energía eléctrica. Al momento de concluir el presente informe, luego de realizar las estimaciones de ahorro de energía, se pudo proyectar que el tiempo de recuperación de la inversión es de 1.05 años, considerándose un tiempo relativamente corto sumado al importante ahorro que se obtiene con el cambio de tecnología, considerándose finalmente que se puede afirmar que el proyecto es viable ya que la recuperación de la inversión es en un corto plazo y de manera efectiva. También es importante mencionar que le con los cálculos anteriores el retorno de la inversión, siendo esta la métrica para saber si a la empresa le conviene llevar a cabo este proyecto, muestra según los resultados finales que es viable y que si representara ahorros importantes.

RECOMENDACIONES

1. Actualizar técnico-mecánica-eléctrica de sus equipos, orientados a la gran eficiencia energética de estos equipos con motores AC y los ASD ya que ofrecen un control completo sobre la velocidad y el consumo de energía del motor AC.

2. Evaluar las tendencias de las aplicaciones eléctricas y otros para que los mismos sean incorporados en el sistema de estudios a fin de modernizar las técnicas de enseñanza.

3. Implementar mayor cantidad de talleres prácticos internos, durante el desarrollo de la carrera, ya que dejan experiencias relevantes que prácticamente solo se aprovechan cuando se está realizando el trabajo final de grado.

4. Actualizar las materias y pensum, incorporando el impacto de las novedades tecnológicas que intervienen en la ingeniería eléctrica; ya que actualmente se está en constante transformación conforme avanzan las tecnologías, para lo cual no se visualizan toma de decisiones inmediatas producto de la incertidumbre y la carencia de estrategias, ejecutándose acciones de emergencia sin considerar las consecuencia de mediano y largo plazo; razón por la cual las universidades deben incentivar y tomar la batuta para estudiar soluciones novedosas en materia de ingeniería eléctrica .

REFERENCIAS

1. Agrega (2021). *Circuito magnético paralelo o en derivación.* Recuperado de http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/04102010/40/es-an_2010100413_9123024/ODE-88f0d0d1-3dba-3457-991b-4f375410bbdb/6_circuito_magntico_paralelo_o_en_derivacin.html-.

2. Alejandro.com. (2021). *Motores de CA / Corriente alterna.* Recuperado de https://sites.google.com/site/aleblogtecin/home/2-electronica-1/corriente-alterna-motores-de-ca.

3. Bandera L. (2000). *Elementos constructivos.* Recuperado de Manual de instrucciones Luigi Bandera Volumen 1.

4. Beltrán Rico M. & Marcilla Gomis A. (2012). *Tecnología de polímeros.* España: Universidad de Alicante.

5. Castillo Umaña Hugo. (2007). *Historia del plástico en Guatemala.* Recuperado de http://www.ingenieriaplastica.com/Entrevistas/entre_Castillo_07.html.

6. Castillo. (2018). *Instrumento de investigación documental*. Recuperado de https://www.lifeder.com/instrumentos-investigacion-documental/

7. Chapman S.J. (2005). *Máquinas Eléctricas.* D.F, México: McGraw Hill.

8. Cienciasfera (2021). *Circuito magnético paralelo o en derivación.* Recuperado de http://cienciasfera.com/materiales/electrotecnia/tema07/6_circuito_magntico_paralelo_o_en_derivacin.html.

9. Collado López Berny Josué. (2016). *Diseño de investigación de actualización en motores eléctricos de corriente continua (CC) entre 50 y 220 hp por motores de corriente alterna (CA) trifásicos.* (tesis de licenciatura). Guatemala: Universidad Juan Carlos de Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0238_ME.pdf.

10. Docplayer (2021). *Electrotecnia aplicada a la ingeniería mecánica UD. 4. Principios de electromagnetismo y funcionamiento y aplicaciones de las diferentes máquinas eléctricas.* Recuperado de https://docplayer.es/31374015-Ud-4-maquinas-electricas-electrotecnia-aplicada-a-la-ingenieria-mecanica.html.

11. Donis. (2014). *Investigación documental.* Recuperado de https://prezi.com/569inqbkz7yf/invetigacion-documental/.

12. Electric, S. (2021). *Manual y catálogo del electricista. Dimensiones y montaje.* Recuperado de https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/6747/mod_resource/content/1/MANUAL%20COMPLETO%20SHCNEIDER.pdf.

13. Electricaplicada.com. (2021). *Diferencia entre motores de AC (Corriente Alternay DC (Corriente Directa).* Recuperado de https://www.electricaplicada.com/diferencia-motores-ac-dc/.

14. Electro Industria. (2017). *Principio de funcionamiento de un VDF.* Recuperado de http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3000.

15. Feito J.S. (2002). *Máquinas Eléctricas.* Madrid, España: Prentice Hall.

16. Fermín, C. (1997). *Maquinaria de extrusión.* Recuperado de https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5001-Maquinaria-de-extrusion.html.

17. Fidias. (2012). *El Proyecto de investigación.* Caracas, Venezuela: Episteme. (6ª Edición ed.).

18. Fitzgerald, C. K. (1980). *Máquina eléctrica.* España: Mc Graw Hill.

19. Fuentes Patricio Concha. (2021). *Curva característica torque-velocidad del motor de inducción.* (Tesis de licenciatura). Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Bio-Bio. Chile: Universidad del Bio-Bio. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0238_ME.pdf.

20. García Fabian & García Ebaristo. (1999). *Estructura e instalación variadores de velocidad ac y dc. Constitución.* (Tesis de licenciatura). Santiago De Cali: Corporación Universitaria Autónoma De Occidente. Recuperado de https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6248/T04256.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

21. Gonzalez Juan. (2020). *Qué son los capitales golondrina.* Recuperado de https://www.queeseconomia.site/capitales-golondrina/.

22. Gourishankar Vembu. (1990). *Conversión de energía electromecánica.* Chicago USA: University of Illinois. Recuperado de https://www.amazon.es/Conversion-energia-electromecanica-Vembu-Gourishankar/dp/B003Z7M06W.

23. Grainger & Stevenson. (1996). *Análisis de sistemas de potencia.* Madrid, España: McGraw-Hill.

24. Guerrero, C. A. (2013). *Variables dependientes e independientes*. Recuperado de https://es.scribd.com/doc/35265543/Variable-Independiente-y-Dependiente.

25. Hernandez, & Hernández. (2014). *Metodología de la investigación.* D.F. México: McGraw-Hill.

26. Hernández-Sampieri, R., Fernandez, C. y Baptista. (2013). *Metodología de la Investigación.* D. F. México: Mc Graw Hill.

27. IEEE3004.8. (2016). *Typical LV adjustable speed drive. IEEE std. 3004.8-2016 Recommended Practice for Motor Protection in Industrial and Commercial Power System.* USA: IEEE-SA Standards Board. Recuperado de https://mentor.ieee.org/3000-stds/dcn/18/stds-18-0003-00-PUBS-3004-8-2016.pdf.

28. Iguren. (2017). *Cómo Funciona Un Arrancador Suave.* Recuperado de https://iguren.es/blog/como-funciona-un-arrancador-suave/.

29. ISSSTE. (2002). *Guía técnica de operación y mantenimiento de sistemas y motores eléctricos.* Recuperado de https://www.yumpu.com/es/document/read/30631600/guia-tecnica-de-operacion-y-mantenimiento-de-sistemas-y-motores-.

30. J. Vera-Sor C. Abeykoon A. L. Kelly E. C. Brown (2014). *Investigation of the process energy demand in polymer extrusion: A brief review and an experimental study Appl. Energy, vol. 136*, 726-737.

31. Legrand. (2017). *Protección industrial.* Catálogo Protección Industrial Legrand.

32. Lerma J. (2017). *El Mecanismo del husillo. Recuperado de*. Recuperado de https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/159596-El-mecanismo-del-husillo.html.

33. Magdalani Jorge. (2021). *¿Cómo ha sido la evolución de los motores eléctricos en el tiempo?* Recuperado de https://www.adslzone.net/e-movilidad/tecnologia/evolucion-motores-electricos/.

34. Magnamata D. (2015). *Extrusión*. Recuperado de https://www.pt-mexico.com/articulos/extrusion-mantenga-su-cambiador-de-mallas-en-funcionamiento.

35. Marcilla B. (2012). *Extrusión de película soplada.* Recuperado de https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/04/extrusion-de-pelicula-soplada.html.

36. Matienzo B. (2011). *Partes fundamentales de un motor eléctrico.* Recuperado de https://sites.google.com/site/279motoreselectricos/partes-fundamentales-de-un-motor-electrico.

37. Mena Roa Mónica. (2021). *La producción de plástico en el mundo.* Recuperado de https://es.statista.com/grafico/21899/distribucion-de-la-produccion-mundial-de-plastico-por-region-en-2018/.

38. Mitsubishi Electric. (2014). *Instruction manual FR-F800.* Recuperado de https://es3a.mitsubishielectric.com/fa/es/dl/11069/281581.pdf.

39. Perat Benavides José I. (2006). *Contribución al control de motores de reluctancia autoconmutados.* (Tesis de licenciatura). Catalunya - España: Universitad Politècnica de Catalunya Departament D'enginyeria Elèctrica.

40. Piedrafita Moreno Ramón. (2004). *Ingeniería de la automatización Industrial. 2ª edición ampliada y actualizada.* España: RA-MA S.A.

41. Piña Alvarado, Jessica. (2020). *Piramide de kelsen*. Recuperado de https://prezi.com/fuebssuwm7pa/piramide-de-kelsen/.

42. PlasticsEurope. (2012). *Plastics - the facts 2012*. Recuperado de https://plasticker.de/Plastics_News_17782_PlasticsEurope_Plastics___the_Facts_2012_report_now_available.

43. Prabhakara Smith & Stra. (1995). *Industrial and commercial power systems handbook.* New York, Estados Unidos de Norteamérica: The McGraw-Hill.

44. ReporteroIndustrial.com. (2021). *Evolución De Los Motores Industriales.* Recuperado de https://www.reporteroindustrial.com/temas/Evolucion-de-los-motores-industriales+99973.

45. Rodriguez M. (2017). *Constitución básica de una máquina de DC. Máquinas de corriente continua.* (Tesis de Licenciatura). Universidad de Cantabria, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, España.

46. Sapiens. (2019). *Conceptos de electrotecnia.* Recuperado de www.sapiensman.com.

47. Sear Zemansky. (1999). *Física universitaria con física moderna.* Volumen *2.* México: Addison-Wesley.

48. SIMOTIC. (2019). *Portafolio de motores.* Recuperado de https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:8ca146be-c299-4404-9f67-9155e48479e0/simotics-20200811.pdf.

49. todoenpolimeros.com. (2017). *Película soplada.* Recuperado de https://todoenpolimeros.com/2017/09/29/pelicula-soplada/.

50. Universidad Miguel Hernández. (2021). *Análisis de circuitos y sistemas lineales.* Recuperado de https://innovacionumh.es/Proyectos/P_19/Tema_4/UMH_01.htm.

51. William H. Hayt & John A. Buck. (2006). *Teoría electromagnética.* México: Mc Grtaw Hill.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Instrumento para la clasificación de fuentes y análisis documental**

CATEGORIA	CLASIFICACION		
1. Procedencia	Artículo en Revista Científica		Original
			De Revisión
			Resultados de la Investigación
			Reporte del Caso
			Carta al Editor
			Editorial
			Revista indexada
			Revista no Indexada
	Libro		Completo
			Capítulo del Libro
	Otros		Monografía
			Ponencia en Congreso, Simposio o Seminario
			Memoria de Congreso, Simposio o Seminario
			Documento Electrónico
			Revista en el Internet
			Material Audiovisual
			Documento Legal
			Material No Publicado
	Tesis Trabajo de Grado		Pregrado
			Maestría
			Doctorado
2. Fuentes y Fechas	Número de Fuentes Referidas		
	Año de Publicación		

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Apéndice 2: **Ficha bibliográfica**

FUENTE BIBLIOGRAFICA	CLASIFICACIÓN	
Artículo en Revista Científica	Autor	
	Fecha	
	Título	
	N° Publicación	
	URL	
Libro	Autor	
	Fecha	
	Título	
	Editor	
	País	
Tesis Trabajo de Grado	Autor	
	Fecha	
	Título	
	Tipo de Tesis	
	Universidad	
	Carrera	
	País	
Publicación en Internet	Autor	
	Fecha	
	Título	
	Publicación	
	URL	
Otra Fuente	Autor	
	Fecha	
	Título	
	Publicación	
	URL	

Fuente: elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.