

# **Sistemas de variación de velocidad con motores trifásicos de inducción**

Francisco Adolfo Jiménez Baracaldo

Asesor

Jairo Luis Gutiérrez Torres

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Ingeniería Electrónica

2022

Página de aceptación

---

---

---

---

---

## Resumen

Actualmente en la industria los procesos que involucran variación de velocidad utilizan mayormente motores de inducción y variadores de frecuencia. La implementación de estos sistemas de forma correcta resulta un poco más compleja que la de los sistemas tradicionales de arranque de motores ya que el uso de electrónica de potencia obliga a tener en cuenta cuestiones adicionales como las perturbaciones en la red y en la carga, la regeneración y el comportamiento del motor con señal de alimentación PWM y con frecuencias distintas de la nominal. La correcta instalación del sistema es de vital importancia para poder garantizar fiabilidad, durabilidad, eficiencia, seguridad y retorno de inversión. En muchos casos la implementación de variadores de frecuencia no busca solucionar un problema de variación de velocidad sino aprovechar alguna otra ventaja como la baja corriente de arranque. En los sistemas de variación de velocidad se busca siempre aprovechar todas sus ventajas posibles y mitigar sus efectos negativos hasta niveles aceptables.

**Palabras clave:** eficiencia energética, distorsión armónica, regeneración, conversión de energía

### **Abstract**

Currently in the industry, processes that involve speed variation mostly use induction motors and frequency inverters. The correct implementation of these systems is a little more complex than that of traditional motor starting systems, since the use of power electronics forces additional issues to be considered, such as disturbances in the network and in the load, the regeneration and motor behavior with PWM power signal and with frequencies other than nominal. The correct installation of the system is of vital importance to guarantee reliability, durability, efficiency, security and return on investment. In many cases, the implementation of frequency inverters does not seek to solve a speed variation problem but to take advantage of some other advantage such as low starting current. In speed variation systems, it is always sought to take advantage of all its possible advantages and mitigate its negative effects to acceptable levels.

***Keywords:*** energy efficiency, harmonic distortion, regeneration, energy conversion

## Tabla de Contenido

Introducción .....	17
Objetivos .....	19
Objetivo General .....	19
Objetivos Específicos.....	19
Formulación del Problema.....	21
Marco Referencial.....	23
Justificación .....	24
Metodología .....	26
El Motor de Inducción Trifásico.....	28
Parámetros de Placa del Motor de Inducción Trifásico .....	29
La Tensión Nominal.....	29
La Frecuencia Nominal .....	30
La Corriente Nominal .....	30
La Potencia Nominal.....	30
La Velocidad Angular .....	31
El Torque Nominal.....	32
Factor de Potencia .....	33
Parámetros Internos del Motor de Inducción Trifásico.....	34
Clasificación de Motores de Inducción Trifásicos.....	37
Por Factor de Servicio.....	37
Por Tipo de Servicio.....	38
Por Eficiencia Energética .....	38
Por Tipo de Aislamiento .....	41
Por Grado de Protección de la Envolvente .....	43

Por Tipo de Refrigeración.....	43
Por Diseño de Relación Torque Velocidad.....	46
Motores de Inducción Trifásicos Especiales.....	47
Los Variadores de Frecuencia.....	49
Ventajas y Desventajas de los Variadores de Velocidad .....	50
Circuitos de Potencia del Variador de Frecuencia .....	53
El Rectificador .....	54
Circuito Intermedio .....	60
El Inversor.....	62
Sistema de Control de los Variadores de Frecuencia.....	64
Control Escalar.....	66
Control Vectorial.....	69
Control Directo de Torque .....	70
Variadores de Frecuencia para Aplicaciones Específicas.....	71
Tipos de Aplicaciones Según Sobrecarga Y Par.....	72
Tipos de Sobrecarga.....	72
Clasificación de aplicaciones por tipo de par.....	75
Variadores de Media Tensión .....	80
Sistemas HI-LO-HI.....	82
Variadores de Media Tensión con Celdas de Baja Tensión.....	84
Variadores con semiconductores de media tensión .....	88
Medición de Variables en Variadores de Frecuencia.....	90
Mediciones Eléctricas en Variadores de Frecuencia.....	90
Medición de velocidad y posición.....	95

Efectos de los Variadores de Frecuencia en la Fuente de Alimentación, la Carga y el Entorno..	98
Interferencia Electromagnética .....	98
Distorcion Armonica.....	103
Ondas Reflejadas.....	111
Tensiones y Corrientes Parasitas de Alta Frecuencia .....	113
Capacitancias Parasitas .....	115
Tensiones y Corrientes de Modo Común.....	117
Corrientes Capacitivas .....	124
Corrientes de Descarga Electrostática (EDM) .....	124
Corrientes de Modo Circulante .....	125
Corrientes de rotor aterrizado.....	126
Ruido Acústico.....	126
Uso de Frecuencia de Conmutación Alta Fija.....	127
Frecuencia de Conmutación Aleatoria .....	128
Filtro Senoidal.....	128
Optimización Automática de Energía .....	128
Modulación Automática de la Frecuencia de Conmutación .....	129
Regeneración y Frenado .....	130
Frenado por Resistencia .....	135
Frenado con Rectificador AFE.....	138
Frenado con Módulo Regenerativo .....	139
Frenado por Bus DC Compartido .....	140
Frenado por Contracorriente .....	141
Frenado por Inyección de Corriente Continua .....	143

Freno Electromecánico.....	144
Consideraciones para el Diseño de Sistemas de Variación de Velocidad .....	146
Cualidades del Sistema de Variación de Velocidad.....	146
Fiabilidad .....	146
Durabilidad.....	146
Eficiencia.....	148
Seguridad .....	148
Retorno de Inversión.....	149
Selección de Elementos del Sistema.....	149
Selección del Motor .....	149
Selección del Variador .....	154
Selección de Protecciones Eléctricas .....	169
Conductores Eléctricos.....	177
Ejemplos y Aplicaciones de Sistemas de Variación de Velocidad por Frecuencia.....	184
Sustitución de Motor DC por Motor de Inducción .....	184
Sistemas de Bombeo de Agua a Presión Constante.....	190
Configuraciones de Bombas .....	190
Ahorro de Energía.....	192
Cambios de Velocidad Nominal de Trabajo .....	197
Ejemplo de Sustitución de Motores para Aumento de Velocidad .....	199
Ejemplo de Sustitución de Motor Dahlander.....	201
Bombeo Solar.....	204
Cargas Regenerativas.....	208
Enrolladora.....	210



Enrollado por Control de Velocidad .....	212
Enrollado por Control de Torque .....	213
Ejemplo de Enrollado de Papel .....	213
Aumento de Potencia en Motores con Conexión $\Delta$ -Y .....	222
Varios Motores con un Solo Variador .....	225
Motores en Paralelo.....	225
Sistema de Alternación .....	227
Variador Usado Solo para Arranque de Motores .....	228
Conclusiones.....	230
Recomendaciones .....	231
Referencias.....	232

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Velocidades síncronas de motores de inducción de acuerdo con su frecuencia nominal y número de polos.....</i>	31
<b>Tabla 2</b> <i>Características de motor Baldor CEBM3546T de 1HP, 60Hz y factor de servicio de 1.15.....</i>	38
<b>Tabla 3</b> <i>Tipos de motores de inducción según su eficiencia en la normatividad IEC y NEMA ..</i>	40
<b>Tabla 4</b> <i>Principales tipos de aislamiento para motores eléctricos.....</i>	42
<b>Tabla 5</b> <i>Ejemplos de motores de acuerdo con su tipo de refrigeración .....</i>	45
<b>Tabla 6</b> <i>Características de diseños de motores según norma NEMA.....</i>	47
<b>Tabla 7</b> <i>Ventajas del uso de variadores de frecuencia .....</i>	51
<b>Tabla 8</b> <i>Desventajas de los variadores de frecuencia y formas de mitigación de estas .....</i>	53
<b>Tabla 9</b> <i>Definiciones de tensiones, corrientes y capacitancias parásitas.....</i>	115
<b>Tabla 10</b> <i>Valores de tensión de modo común .....</i>	118
<b>Tabla 11</b> <i>Valores de velocidad angular, torque y potencia en cada cuadrante .....</i>	133
<b>Tabla 12</b> <i>Factor de corrección para derrateo de motores.....</i>	153
<b>Tabla 13</b> <i>Dimensionamiento de variador de acuerdo con la aplicación.....</i>	158
<b>Tabla 14</b> <i>Principales clases de paradas seguras .....</i>	168
<b>Tabla 15</b> <i>Esquemas de conexión a tierra .....</i>	175
<b>Tabla 16</b> <i>Conductores recomendados para señales analógicas y de encoder .....</i>	181
<b>Tabla 17</b> <i>Características de motor CC a ser reemplazado.....</i>	186
<b>Tabla 18</b> <i>Características de motor de inducción seleccionado .....</i>	188
<b>Tabla 19</b> <i>Cambio de torque y potencia del sistema según la aplicación.....</i>	198
<b>Tabla 20</b> <i>Valores de torque para ejemplo de motor de 15 kW .....</i>	199

<b>Tabla 21</b> <i>Valores de potencia para ejemplo de motor de 15 kW</i> .....	200
<b>Tabla 22</b> <i>Valores de motor dahlander de ejemplo</i> .....	201
<b>Tabla 23</b> <i>Datos del ejemplo de enrollado</i> .....	215

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Circuito equivalente por fase de un motor de inducción trifásico, referido al lado del estator</i> .....	35
<b>Figura 2</b> <i>Pérdidas en un motor trifásico de inducción</i> .....	39
<b>Figura 3</b> <i>Algunos motores especiales Baldor</i> .....	48
<b>Figura 4</b> <i>Rectificador no controlado</i> .....	54
<b>Figura 5</b> <i>Rectificador semicontrolado</i> .....	56
<b>Figura 6</b> <i>Rectificador controlado</i> .....	57
<b>Figura 7</b> <i>Rectificador AFE</i> .....	57
<b>Figura 8</b> <i>Rectificador de doce pulsos</i> .....	58
<b>Figura 9</b> <i>Circuito intermedio básico de tensión constante</i> .....	60
<b>Figura 10</b> <i>Circuito intermedio de tensión constante con inductancias en el bus DC</i> .....	61
<b>Figura 11</b> <i>Circuito intermedio de tensión variable</i> .....	61
<b>Figura 12</b> <i>Circuito intermedio de tensión variable por chopper</i> .....	62
<b>Figura 13</b> <i>Circuito inversor típico para variador de frecuencia</i> .....	63
<b>Figura 14</b> <i>Circuito inversor típico para variador de frecuencia de fuente de corriente</i> .....	64
<b>Figura 15</b> <i>Motor de corriente continua de conexión independiente</i> .....	65
<b>Figura 16</b> <i>Relaciones V/f para un motor de 60 Hz, 480 VAC</i> .....	67
<b>Figura 17</b> <i>Diagramas de control V/f</i> .....	68
<b>Figura 18</b> <i>Esquema de control vectorial por flujo de campo con realimentación de velocidad</i> .	69
<b>Figura 19</b> <i>Esquema de control DTC en lazo abierto</i> .....	70
<b>Figura 20</b> <i>Placa de datos de variador de frecuencia de uso general</i> .....	73
<b>Figura 21</b> <i>Ejemplo de curva de IGBT y tipos de sobrecarga</i> .....	75

<b>Figura 22</b> <i>Curvas de desempeño con variador de motor WEG W22 IE3 200 HP</i> .....	77
<b>Figura 23</b> <i>Curvas de torque vs velocidad</i> .....	77
<b>Figura 24</b> <i>Curvas de potencia vs velocidad</i> .....	78
<b>Figura 25</b> <i>Curvas de corriente vs velocidad</i> .....	78
<b>Figura 26</b> <i>Comportamiento de la tensión con respecto a la velocidad</i> .....	79
<b>Figura 27</b> <i>Comportamiento de la tensión con respecto a la velocidad</i> .....	82
<b>Figura 28</b> <i>Diagrama unifilar de VFD MT con celdas BT</i> .....	85
<b>Figura 29</b> <i>Circuito de celda de baja tensión</i> .....	86
<b>Figura 30</b> <i>Celdas de baja tensión instaladas en variador MT</i> .....	88
<b>Figura 31</b> <i>Principales topologías de variadores con semiconductores MT</i> .....	89
<b>Figura 32</b> <i>Analizador de motores Fluke MDA-550</i> .....	94
<b>Figura 33</b> <i>Encoders incremental y absoluto</i> .....	95
<b>Figura 34</b> <i>Esquema eléctrico de un resolver</i> .....	97
<b>Figura 35</b> <i>Tipos de acoples de interferencia electromagnética</i> .....	99
<b>Figura 36</b> <i>Emisión EMI en un variador de frecuencia</i> .....	100
<b>Figura 37</b> <i>Filtro EMI externo Schaffner con su esquema eléctrico</i> .....	101
<b>Figura 38</b> <i>Niveles permitidos de emisión y niveles requeridos de inmunidad</i> .....	103
<b>Figura 39</b> <i>Señal de corriente no lineal con sus espectros</i> .....	106
<b>Figura 40</b> <i>Punto de acople común</i> .....	108
<b>Figura 41</b> <i>Vectores de potencia</i> .....	110
<b>Figura 42</b> <i>Pulso de salida de variador y pulso de entrada de motor con onda reflejada</i> .....	112
<b>Figura 43</b> <i>Diagramas de tensiones, corrientes y capacitancias parasitas</i> .....	114
<b>Figura 44</b> <i>Generación de la tensión de modo común</i> .....	119

<b>Figura 45</b> <i>Esquema de filtro seno</i> .....	121
<b>Figura 46</b> <i>Esquema de filtro dv/dt</i> .....	122
<b>Figura 47</b> <i>Reactores dv/dt</i> .....	122
<b>Figura 48</b> <i>Bobina de choque</i> .....	123
<b>Figura 49</b> <i>Filtro de modo común y modo de instalación</i> .....	123
<b>Figura 50</b> <i>Cuadrantes de funcionamiento de un motor eléctrico trifásico de inducción</i> .....	131
<b>Figura 51</b> <i>Diagrama unifilar de sistema de frenado por resistencia</i> .....	137
<b>Figura 52</b> <i>Diagrama unifilar de sistema regenerativo con rectificador AFE</i> .....	139
<b>Figura 53</b> <i>Diagrama unifilar de sistema con módulo regenerativo</i> .....	140
<b>Figura 54</b> <i>Sistemas con bus DC compartido</i> .....	141
<b>Figura 55</b> <i>Sistema de frenado por contracorriente en arranque directo</i> .....	143
<b>Figura 56</b> <i>Diagrama de frenado por corriente continua en arranque directo</i> .....	144
<b>Figura 57</b> <i>Modelo de curva de la bañera</i> .....	147
<b>Figura 58</b> <i>Placa de Motor WEG fabricado para trabajo a 2600 metros</i> .....	154
<b>Figura 59</b> <i>Variadores Vacon con distintos tipos de encerramiento</i> .....	160
<b>Figura 60</b> <i>Variador con envolvente explosion proof</i> .....	161
<b>Figura 61</b> <i>Cable de potencia para variador de frecuencia</i> .....	178
<b>Figura 62</b> <i>Instalación eléctrica correcta en cuanto a EMC de un convertidor de frecuencia en el armario</i> .....	180
<b>Figura 63</b> <i>Tipos de apantallamiento para cables de motor</i> .....	183
<b>Figura 64</b> <i>Aplicación on-line de Baldor-Reliance para selección de motores</i> .....	187
<b>Figura 65</b> <i>Comparación de curvas de motores DC shunt y de inducción de 0.75HP</i> .....	189
<b>Figura 66</b> <i>Sistemas alterno-aditivos de tres bombas</i> .....	191

<b>Figura 67</b> <i>Curvas de una bomba centrífuga</i> .....	193
<b>Figura 68</b> <i>Comparativa de métodos de regulación de presión</i> .....	194
<b>Figura 69</b> <i>Comparación entre motor Dahlander y motores de velocidad fija con VFD</i> .....	203
<b>Figura 70</b> <i>Principales topologías de bombeo solar</i> .....	206
<b>Figura 71</b> <i>Esquema básico de una aplicación de enrollado</i> .....	212
<b>Figura 72</b> <i>Longitud, velocidad y aceleración con respecto al tiempo</i> .....	216
<b>Figura 73</b> <i>Ángulo, velocidad y aceleración angulares con respecto al tiempo</i> .....	217
<b>Figura 74</b> <i>Radio del rollo e inercia con respecto al tiempo</i> .....	218
<b>Figura 75</b> <i>Torques con respecto al tiempo</i> .....	219
<b>Figura 76</b> <i>Potencias con respecto al tiempo</i> .....	220
<b>Figura 77</b> <i>Principales variables con respecto al tiempo</i> .....	221
<b>Figura 78</b> <i>Comparación entre conexión normal y conexión de 87 Hz</i> .....	224
<b>Figura 79</b> <i>Varios motores en paralelo con un solo variador</i> .....	226
<b>Figura 80</b> <i>Sistema de alternación de motores</i> .....	228
<b>Figura 81</b> <i>Arranque de motores por variador de frecuencia</i> .....	229

## Lista de Apéndices

<b>Apéndice A.</b> <i>Valores Mínimos De Factor De Servicio Según Norma NEMA MG-01</i> .....	241
<b>Apéndice B.</b> <i>Tipos De Servicio De Motores De Inducción Según Norma IEC 34-1</i> .....	242
<b>Apéndice C.</b> <i>Clases De Pérdidas En Motores De Inducción</i> .....	247
<b>Apéndice D.</b> <i>Métodos Para Hallar La Eficiencia Energética De Los Motores De Inducción.</i> ..	249
<b>Apéndice E.</b> <i>Comparación De Motores De Iguales Características Y Distintos Niveles De Eficiencia</i> .....	250
<b>Apéndice F.</b> <i>Valores De Límite De Eficiencia Según La Norma IEC</i> .....	251
<b>Apéndice G.</b> <i>Clases De Eficiencia Para Motores De Cuatro Polos A 50 Hz</i> .....	252
<b>Apéndice H.</b> <i>Grados de Protección IP</i> .....	253
<b>Apéndice I.</b> <i>Principales Tipos De Protecciones Según Norma NEMA</i> .....	255
<b>Apéndice J.</b> <i>Nomenclatura IC</i> .....	256
<b>Apéndice K.</b> <i>Curvas Típicas De Torque Contra Velocidad En Arranque Directo Según Diseño NEMA</i> .....	258
<b>Apéndice L.</b> <i>Conexión a tierra del apantallamiento de los cables</i> .....	259
<b>Apéndice M.</b> <i>Comparación De Motores AC Y DC De 0.75 HP, 1750 RPM</i> .....	261
<b>Apéndice N.</b> <i>Ecuaciones de inercia rotacional de algunos solidos</i> .....	263
<b>Apéndice O.</b> <i>El Convertidor Matricial</i> .....	265
<b>Apéndice P.</b> <i>Niveles Máximos De Distorsión Armónica Permitidos Por La Norma IEEE 519 2014</i> .....	268
<b>Apéndice Q.</b> <i>Mitigación De Armónicos</i> .....	270



## Introducción

El desarrollo que han tenido en las últimas décadas los dispositivos semiconductores de potencia ha permitido un aumento considerable de su utilización en la industria para distintos fines. El aumento de las capacidades de los dispositivos semiconductores de potencia ha obligado también a desarrollar estrategias de control que permitan obtener el máximo rendimiento posible de estos dispositivos.

Los variadores de frecuencia y los arrancadores suaves son el caso más evidente de implementación de equipos de electrónica de potencia en la industria. Las ventajas que estos ofrecen en el control y arranque de motores les ha permitido ganar terreno frente a sistemas convencionales de arranques de motores como arranques directos o arranques estrella-triángulo. La mayoría de estos equipos ha permitido reducir sus costos de producción por lo que cada vez son más accesibles y tienen una relación costo-beneficio más atractiva aumentando el rango de soluciones que pueden brindar.

Por otra parte, los motores eléctricos asíncronos trifásicos presentan características que les permiten estar presentes en diversas aplicaciones de la industria desde hace varias décadas y ser los más usados. Su desarrollo también es notorio ya que se ha hecho un gran énfasis en mejorar continuamente su eficiencia y se han desarrollado motores de inducción trifásicos para muchas aplicaciones especiales.

Su preponderancia en la industria solo podrá verse amenazada hasta que motores con características superiores (principalmente en eficiencia) puedan tener costos más competitivos y sea más común tenerlos como opciones frente a los motores de inducción. En un futuro los principales rivales del motor de inducción serán el motor de reluctancia síncrono y el motor

trifásico de imán permanente. En los países con leyes más estrictas con respecto a la eficiencia energética es más común el uso de estos motores.

Vale la pena aclarar que el costo de la energía que consume un motor eléctrico que se use todos los días durante varias horas, rápidamente superará el costo del motor mismo, por lo que un pequeño aumento de eficiencia en un motor hará que el dinero ahorrado por costo de energía en un determinado lapso pueda ser mayor que el costo del motor.

Anteriormente cuando una aplicación requería variación de velocidad era común el uso de motores de corriente continua, motores de varias velocidades y sistemas mecánicos de engranajes con velocidad variable. En la actualidad el uso de motores de inducción con variador de frecuencia ha permitido sustituir la mayor parte de los métodos anteriormente mencionados ofreciendo mayores ventajas que estos.

La correcta implementación de variadores de frecuencia implica tener un conocimiento sobre estos y sobre el sistema de variación de velocidad en general para lograr una alta fiabilidad y eficiencia en el sistema ya que su complejidad es mucho mayor que la de los sistemas tradicionales de arranque de motores de inducción trifásicos.

La presente monografía se ha desarrollado para reunir la información necesaria para poder implementar y evaluar sistemas de variación de velocidad con motores trifásicos de inducción de forma correcta y para comprender y poder mejorar sistemas de este tipo ya existentes.

## Objetivos

### Objetivo General

El objetivo general de esta monografía es realizar un compendio de la información necesaria para diseñar y comprender de forma correcta sistemas de variación de velocidad con motores de inducción trifásicos teniendo en cuenta los elementos que intervienen, su interacción entre sí y los efectos de su utilización.

### Objetivos Específicos

Explicar la forma de diseñar sistemas de variación de velocidad con motores de inducción trifásicos cumpliendo con las normas establecidas.

Explicar la forma de evaluar si un sistema de variación de velocidad está implementado correctamente.

Brindar una guía general para los fabricantes de maquinaria que les permita facilitar el diseño de sistemas de variación de velocidad de manera correcta.

Dar a conocer las formas de optimizar un sistema de variación de velocidad con variador de frecuencia.

Exponer las formas de mitigar los efectos negativos de los variadores de frecuencia.

Dar las bases para evaluar la rentabilidad de usar variadores de frecuencia con el fin de ahorrar energía eléctrica.

Exponer los puntos clave que se deben tener en cuenta para garantizar la fiabilidad de un sistema de variación de velocidad.

Explicar el funcionamiento de los elementos que intervienen en un sistema de variación de velocidad.

Recopilar información fiable relacionada con los distintos temas involucrados en los sistemas de variación de velocidad.

## Formulación del Problema

La variación de la velocidad de los motores eléctricos es una necesidad cada vez más evidente en la industria. En muchos casos se necesita para reducir el consumo de energía eléctrica principalmente en las aplicaciones de bombeo. En otros casos el proceso exige una velocidad determinada como en el caso de las bandas transportadoras.

El diseño de un sistema de variación de velocidad implica no solo saber escoger el variador de frecuencia y el motor apropiado, sino que también se deben tener en cuenta problemas que pueden afectar el funcionamiento del sistema y de circuitos cercanos como por ejemplo la generación de armónicos, la compatibilidad electromagnética, la regeneración de tensión, la refrigeración del variador, protecciones contra sobre corriente, protecciones de cortocircuito, protecciones contra transitorios de tensión y la puesta a tierra entre otros.

A pesar de que los variadores de frecuencia cuentan con guías de diseño, estas están basadas más en la funcionalidad que en brindar un verdadero conocimiento sobre el tema y en muchas ocasiones no son suficientes para realizar un proyecto fiable.

La implementación de un variador de frecuencia puede ser la solución a un problema, pero si no se implementa correctamente este puede acarrear nuevos problemas o tener poca fiabilidad. Entre los problemas más comunes debido a la mala implementación de sistemas de variación de velocidad está el sobredimensionamiento innecesario de equipos, el recalentamiento de motores por trabajar a velocidades muy bajas, los daños en bancos de condensadores aguas arriba de los variadores, la regeneración de los motores, la interferencia electromagnética, etcétera.

La pregunta de investigación es:

¿Cómo diseñar o evaluar un sistema de variación de velocidad por variación de frecuencia para motor eléctrico asíncrono trifásico teniendo en cuenta las exigencias del proceso en que trabajará y garantizando su fiabilidad y su eficiencia?

## Marco Referencial

El desarrollo de una tecnología por más efectiva y novedosa que sea no implica su inmediata implementación. Existen factores que pueden hacer que una tecnología no se implemente o no atraiga el interés de los fabricantes por más efectiva y/o novedosa que sea. Un buen caso es el del automóvil eléctrico que se desarrolló a la par con el de combustión interna pero su desarrollo se detuvo a principios del siglo XX y se volvió a retomar desde hace unos años.

Los sistemas de variación de velocidad de motores de inducción trifásicos no necesariamente involucran desarrollos de última tecnología. Mas bien involucran la integración de tecnologías que se desarrollaron hace un tiempo considerable. Por el lado de los variadores de frecuencia conceptos que parecen innovadores como el control directo de torque (DTC) o el convertidor matricial tienen una implementación relativamente reciente pero un desarrollo que se remonta a décadas atrás.

En el caso de los motores de inducción trifásicos su desarrollo reciente prácticamente se ha centrado en aumentar su eficiencia. El desarrollo más notorio en motores eléctricos se ha presentado en los de imán permanente y en los de reluctancia síncronos que se encuentran fuera del alcance de esta monografía y son ampliamente usados en vehículos eléctricos, pero aún están lejos de desplazar al motor de inducción en el campo de la industria.

## Justificación

La variación de velocidad por frecuencia de motores eléctricos asíncronos involucra principalmente disciplinas como la electrónica de potencia y las máquinas eléctricas. Los textos académicos más conocidos de estas áreas presentan una enorme distancia con las aplicaciones del mundo real por lo que no son suficientes para abordar temas de sistemas de variación de velocidad ya que el asunto del diseño no es tratado.

Para el caso de los libros de máquinas eléctricas estos no van a la par con lo que se maneja en la actualidad y prácticamente no tratan la variación de velocidad por tensión-frecuencia en los motores eléctricos. Los textos básicos de circuitos eléctricos siguen hablando del “triángulo de potencia” y dan el mismo significado al  $\cos(\varphi)$  que al factor de potencia sin tomar en cuenta que la distorsión armónica es una realidad palpable ya en muchos circuitos eléctricos.

El empezar a trabajar con variadores de frecuencia presenta un verdadero choque con los conocimientos previos por lo que puede ser un gran problema diseñar un sistema de variación de velocidad correctamente si no se cuenta con experiencia.

La mayor parte de la información sobre sistemas de variación de velocidad se encuentra en documentación de fabricantes de variadores de frecuencia y en documentos de investigación. En las universidades muchas veces no existe un curso sobre este tema en carreras como ingeniería eléctrica o ingeniería electrónica teniendo los profesionales que trabajan en esta área que aprender por sí mismos lo relacionado con el tema.

Los variadores de frecuencia para motores eléctricos que existen en el mercado aun en los modelos más sencillos presentan un número elevado de parámetros y opciones de configuración que muchas veces son desconocidos por quienes realizan su instalación por falta de



conocimiento sobre el tema. Si se hiciera una correcta configuración de estos dispositivos su rendimiento sería más elevado.

En otros casos se realizan diseños que presentan sobredimensionamiento innecesario de equipos para poder alcanzar las metas de funcionamiento de un proceso generando sobrecostos en el proyecto. El uso de equipos no aptos o demasiado básicos para la función que van a cumplir por ahorrar en costos también es un error frecuente.

En muchos casos los fabricantes de variadores de frecuencia tienen productos desarrollados para aplicaciones específicas que pueden tener un rendimiento óptimo, pero son desconocidos por quienes fabrican maquinaria que involucra variación de velocidad.

Por lo tanto, la presente monografía busca compilar la información de varias disciplinas para que sirva de guía principalmente a fabricantes de maquinaria industrial, encargados de mantenimiento y proyectos en plantas industriales y personas que necesiten información sobre sistemas de variación de velocidad con variadores de frecuencia.

## **Metodología**

La presente monografía tiene como base para los temas tratados el conocimiento empírico del autor. Para dar validez a este conocimiento se ha acudido a distintos tipos de fuentes que han servido para comprobarlo, profundizarlo y en ocasiones también para refutarlo y encaminarlo correctamente.

Las múltiples áreas que componen el tema, así como su aplicación en el mundo real han hecho obligatorio que se haya tenido que acudir a tipos de fuentes muy variados. Por una parte, están los libros de texto de máquinas eléctricas y electrónica de potencia que brindan una buena base de conocimiento pero que están lejos de abordar temas de aplicaciones en el mundo real.

Otro tipo de fuentes que se han seleccionado para realizar la siguiente monografía son textos, artículos científicos y proyectos de grado de temas específicos. Estos están más cerca del mundo real y permiten abordar temas de importancia relevante que no están en los textos básicos o no tienen la suficiente profundidad.

Los manuales, artículos, fichas técnicas y catálogos de fabricantes son las fuentes que han servido para darle a esta monografía el acercamiento al mundo real. Se han usado en muchos casos para tratar temas básicos que son muy técnicos para aparecer en textos académicos o muy simples para estar en artículos científicos. Debido a la distancia que tienen este tipo de fuentes con la academia se ha buscado usarlas lo menos posible por lo que las veces que se han citado es debido a que no se ha encontrado esta información en otro tipo de fuentes.

Las normas y reglamentos técnicos son otro tipo de fuente al que se ha acudido. Estos son de suma importancia para poder usar el conocimiento teórico en el mundo real ya que ofrecen los detalles que se deben tener en cuenta para que un proyecto esté dentro de los estándares de

seguridad y de calidad. Estas fuentes en ocasiones se han encontrado separadas y en otras ocasiones dentro de textos académicos, artículos científicos o documentos de fabricantes.

Otra forma de validación de conocimiento que se ha empleado es el uso de simulaciones con el programa Scilab. Todas las gráficas propias de la monografía se han realizado con este software.

En esta monografía se han usado bastantes gráficas e imágenes para poder dar una buena claridad sobre los temas tratados y para que las personas no familiarizadas con el tema puedan conocer más claramente de lo que se está hablando.

## **El Motor de Inducción Trifásico**

El motor de inducción también llamado motor asíncrono debido a que no funciona con la frecuencia síncrona impuesta por la red, es el tipo de motor más usado actualmente en la industria debido a sus características que le permiten ser utilizado en la mayoría de las aplicaciones.

Hasta hace unos años tradicionalmente se utilizaba el motor de inducción en aplicaciones donde no se requería variación de velocidad mientras que cuando esta se requería se utilizaban motores de corriente continua. Con el auge de los variadores de frecuencia, los motores de inducción han desplazado en gran medida a los motores de corriente continua (Mora Fraile, 2003. p. 259).

En la actualidad la eficiencia energética ha tomado una gran importancia principalmente en los países desarrollados. Esto se ha visto reflejado en el desarrollo de motores de inducción cada vez más eficientes y en el desarrollo de otros tipos de motores que superan en eficiencia a los motores de inducción de mayor rendimiento como los motores de imán permanente y los de reluctancia síncronos (ABB, 2011, p. 56-61).

Estos motores tienen también un excelente comportamiento en sistemas de variación de velocidad siendo el costo junto con la necesidad obligatoria de uso de variador de frecuencia sus principales limitantes para su masificación. Sin embargo, a medida que baje su precio será más rápido el retorno de inversión por ahorro de energía y esto hará que desplacen cada vez más al motor de inducción en aplicaciones que requieran variación de velocidad y uso intensivo.

Los parámetros de placa son el primer tema que se abordará en el capítulo de los motores de inducción ya que su explicación servirá de base para comprender los temas siguientes.

## **Parámetros de Placa del Motor de Inducción Trifásico**

Los motores de inducción trifásicos están diseñados para tener su máximo rendimiento bajo un determinado conjunto de condiciones nominales que se encuentran en la placa de datos. La tensión y la frecuencia nominales de alimentación son parámetros que debe cumplir la red para que el motor funcione de manera óptima. La potencia, la corriente, las revoluciones por minuto, el torque y el factor de potencia nominales se presentan cuando el motor trabaja con una carga que le exige llegar hasta estos valores estando alimentado bajo condiciones nominales. Estos parámetros de placa son los que generalmente son requeridos por los variadores de frecuencia para configurar el tipo de motor que van a controlar.

Existen muchos más parámetros como la eficiencia o el factor de servicio. Algunos de estos serán tratados en la sección de Formas de clasificación de motores de inducción trifásicos.

### ***La Tensión Nominal***

La tensión nominal es la tensión rms de línea que alimenta el motor. Las señales de tensión de línea y de fase deben tener un desfase  $120^\circ$  entre sí. Algunos valores típicos para motores de inducción trifásicos de baja tensión son 220VAC, 380VAC, 440VAC y 690VAC entre muchos otros. Lo más común es que tengan la opción de trabajar con dos niveles de tensión cambiando la forma de conexión de sus bornes. En otros casos pueden trabajar con más de dos niveles de tensión y en algunos pocos casos solo trabajan con un nivel de tensión.

En el caso de los motores trifásicos de inducción de media tensión, las tensiones más típicas son 3300VAC, 4160VAC, 6600VAC y motores que funcionan con niveles de tensión típicos de redes públicas de media tensión como 11.4kVAC o 13.8kVAC.

### ***La Frecuencia Nominal***

La frecuencia nominal de los motores trifásicos de inducción convencionales es por lo general de 60 Hz para Estados Unidos y la mayor parte de Latinoamérica y de 50 Hz para el resto del mundo. Al igual que en el caso de la tensión también existen motores que pueden trabajar con las dos frecuencias.

Existen motores especiales con frecuencias nominales más altas como 100 Hz o 400 Hz, por ejemplo. Estos deben alimentarse con variadores de frecuencia. Los motores inverter duty tienen una frecuencia nominal que puede ser una frecuencia típica de red, pero están diseñados para funcionar en un alto rango de frecuencias. Estos también deben funcionar con un variador de frecuencia.

La mayor parte de los motores convencionales de inducción trifásicos permiten el uso de variadores de frecuencia, pero su rango de revoluciones es mucho menor que el de los motores inverter duty. Este rango debe ser consultado con el fabricante.

### ***La Corriente Nominal***

La corriente nominal del motor es de los parámetros más importantes de la placa de datos ya que en base a esta se calculan las protecciones y elementos de maniobra que tendrá el motor. Aunque existen tablas que dan un valor de corriente según la potencia y la tensión del motor estos valores pueden llegar a diferir bastante según la construcción del motor. Los arrancadores suaves y variadores de velocidad tienen como límite la corriente nominal del motor y no la potencia como se podría pensar.

### ***La Potencia Nominal***

La potencia nominal del motor puede venir expresada en kW, en HP o en las dos formas. Se presenta cuando el motor gira a velocidad y torque nominales. Esto implica que la corriente y

el factor de potencia también tienen el valor nominal. En la potencia nominal se han restado las pérdidas que tiene el motor al convertir la energía eléctrica en energía mecánica. La potencia nominal no necesariamente es la potencia máxima del motor ya que este puede tener un factor de servicio superior a uno.

### ***La Velocidad Angular***

La velocidad angular más conocida en la industria como “las revoluciones por minuto”, depende en gran medida del número de polos del motor y de la frecuencia de alimentación de este. Con estos dos parámetros se puede definir la velocidad síncrona del motor que es la velocidad con que gira el campo magnético variable a lo largo de la periferia del rotor cuando las corrientes sufren un cambio de un ciclo (Bhag S. et al, 2002. p. 511).

En la Tabla 1 se pueden observar las velocidades síncronas más comunes en el mercado.

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (2)$$

**Tabla 1**

*Velocidades síncronas de motores de inducción de acuerdo con su frecuencia nominal y número de polos*

Frecuencia	Número de polos del motor			
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
50 Hz	3000 RPM	1500 RPM	1000 RPM	750 RPM
60 Hz	3600 RPM	1800 RPM	1200 RPM	900 RPM

*Fuente.* Autoría propia

La Ecuación (1) expresa la velocidad síncrona del motor en radianes por segundo donde  $\omega_s$  es la velocidad angular síncrona,  $p$  es el número de polos del motor y  $f$  es la frecuencia a la que se alimenta el motor. La Ecuación (2) expresa la velocidad síncrona del motor en revoluciones por minuto donde  $N_s$  es la velocidad angular en revoluciones por minuto.

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} \quad (1)$$

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (2)$$

La construcción del motor de inducción no permite que el eje gire a la velocidad síncrona, sino que esta gira a una velocidad ligeramente menor. La diferencia entre la velocidad del motor y la velocidad síncrona es conocida como deslizamiento y se puede expresar en unidades de velocidad angular como velocidad de deslizamiento o de manera porcentual. El deslizamiento generalmente no es un parámetro de placa del motor y además depende de la carga de este. Por lo tanto, podemos hablar de un deslizamiento nominal cuando el motor trabaja a plena carga en condiciones nominales.

El deslizamiento está definido en unidades de velocidad en la Ecuación (3) donde  $N_r$  es la velocidad con que gira el rotor en revoluciones por minuto,  $N_s$  es la velocidad síncrona en revoluciones por minuto y  $N_m$  es la velocidad de deslizamiento. En la Ecuación (4) el deslizamiento  $s$  está expresado en forma porcentual.

$$N_r = N_s - N_m \quad (3)$$

$$s = \frac{N_s - N_m}{N_s} \quad (4)$$

### ***El Torque Nominal***

El torque nominal del motor generalmente esta expresado en Newton/metro que es la unidad del sistema internacional de medidas. En algunas ocasiones este no está especificado en la placa del motor, pero se puede calcular fácilmente a partir de la potencia nominal y la velocidad angular nominal como lo muestra la Ecuación (5) donde  $T_n$  es el torque nominal del



motor,  $P_n$  es la potencia nominal de motor y  $\omega_n$  es la frecuencia nominal del eje del motor en radianes por segundo.

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (5)$$

Como la velocidad angular nominal en la placa del motor siempre esta expresada en revoluciones por minuto, se debe realizar la conversión de revoluciones por minuto a radianes por segundo para obtener la medida de torque en Newtons metro como lo muestra la Ecuación (6). Por lo tanto, el torque nominal del eje del motor basado en datos de placa se calcula como lo muestra la Ecuación (7).

$$\text{RPM} = 0.1047 \text{ Rad/s} \quad (6)$$

$$T_n = \frac{P_n}{0,1047 N_n} \quad (7)$$

El torque es directamente proporcional al número de polos de un motor. Si dos motores tienen la misma potencia y el mismo porcentaje de deslizamiento, pero distinto número de polos, el de menos polos tendrá menos torque, pero más velocidad mientras que el de más polos tendrá más torque, pero menos velocidad. Sin embargo, ambos tendrán la misma relacione torque-número de polos y velocidad-número de polos.

### ***Factor de Potencia***

El factor de potencia FP es equivalente a  $\cos \phi$  cuando la carga es lineal. Es decir, cuando la forma de la señal de corriente es sinusoidal. Un motor de inducción alimentado directamente por la red es un ejemplo de una carga lineal, aunque vale la pena mencionar que el motor de inducción produce una pequeña distorsión armónica que la mayoría de las veces es despreciable. El factor de potencia de los motores de inducción depende en gran medida de la carga como se puede ver en el ejemplo de la Tabla 2.

Con el uso de variadores de frecuencia el factor de potencia debido a la potencia reactiva visto por la red se acerca bastante a uno sin importar la carga del motor. Sin embargo, los variadores de frecuencia aportan una distorsión armónica que debe ser mitigada de forma análoga a como los bancos de condensadores controlan la potencia reactiva con cargas lineales.

### **Parámetros Internos del Motor de Inducción Trifásico**

Además de los parámetros de placa, los motores de inducción cuentan con ciertos parámetros internos que definen sus características de funcionamiento. Estos parámetros generalmente no son suministrados por los fabricantes, sino que en caso de ser requeridos deben ser medidos o calculados por medio de distintos métodos existentes.

Los parámetros de placa deben ser suficientes para estimar la idoneidad de un motor para una aplicación. Los parámetros internos por su parte sirven para estudiar más en profundidad el funcionamiento de un motor de inducción o para definir si presenta fallas cuando estos parámetros están por fuera de un rango esperado.

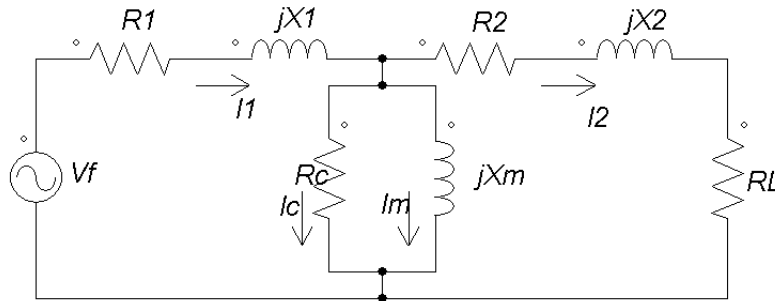
Los variadores de frecuencia cuentan generalmente con funciones de detección de parámetros internos de los motores de inducción para tener un óptimo funcionamiento. Algunos parámetros internos del motor están presentes en su modelo equivalente como se muestra en la Figura 1. Un motor trifásico de inducción ideal tendría tres circuitos iguales a los de la Figura 1 en todos sus parámetros excepto en su tensión de fase que variaría  $120^\circ$  con respecto al  $V_f$  de los demás circuitos.

En el lado del estator  $V_f$  es la tensión de fase,  $I_1$  es la corriente de fase,  $R_1$  es la resistencia del devanado del estator,  $X_1$  es la reactancia por dispersión del devanado del estator,  $R_c$  es la resistencia equivalente de la pérdida en el núcleo,  $X_m$  es la reactancia de magnetización,  $I_1$  es la

corriente del rotor  $I_c$  es la corriente de pérdida en el núcleo y por último  $I_m$  es la corriente de magnetización.

**Figura 1**

*Circuito equivalente por fase de un motor de inducción trifásico, referido al lado del estator*



*Fuente.* Bhag S, Guru y Huseyn R, Hiziroglu. Máquinas eléctricas y transformadores. 3 ed. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de CV., 2002. 699p. ISBN 978-970-15-1212-8

Los parámetros en el lado del rotor en el circuito de la Figura 1, no son medibles, sino que son equivalentes y se calculan en base a otros parámetros que si son medibles y a la relación de transformación entre el estator y el rotor. La resistencia equivalente  $R_2$  se define en la Ecuación (8).

$$R_2 = a^2 R_r \quad (8)$$

Donde  $R_r$  es la resistencia del rotor y  $a$  es la relación de transformación entre el estator y el rotor como lo muestra la Ecuación (9).

$$a = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \quad (9)$$

Donde  $N_1$  es el número de vueltas del devanado del estator,  $N_2$  es el número de vueltas del devanado del rotor,  $k_{w1}$  es el factor de devanado del estator y  $k_{w2}$  es el factor de devanado del rotor.

La reactancia equivalente  $X_2$  se define en la ecuación (10).

$$X_2 = a^2 X_b \quad (10)$$

Donde  $X_b$  es la reactancia por dispersión del devanado del rotor en condición de rotor fijo. Es decir, cuando el deslizamiento es igual a uno.

La corriente equivalente  $I_2$  se define en la Ecuación (11).

$$I_2 = \frac{I_r}{a} \quad (11)$$

La resistencia equivalente de carga  $R_L$  se define en la ecuación (12).

$$R_L = \frac{R_2}{s} (1 - s) \quad (12)$$

La potencia que disipa la resistencia  $R_L$  es equivalente a la potencia mecánica del motor por fase, sin embargo, las pérdidas mecánicas en el motor de inducción como la fricción y la energía requerida para efectuar la ventilación no están involucradas en el circuito y por lo tanto deben ser restadas.

Los parámetros anteriormente mencionados hacen parte del estator del motor de inducción y son por fase, es decir que un motor trifásico de inducción ideal tendría tres circuitos iguales en todos sus parámetros excepto en la fase de su  $V_f$  que variaría  $120^\circ$  con respecto al  $V_f$  de los demás circuitos.

Existen tres métodos descritos en la norma IEEE 112 para determinar los parámetros internos de los motores de inducción por medio de pruebas y mediciones. Estos son: prueba en vacío, prueba con corriente directa para determinar la resistencia del estator y prueba con rotor bloqueado (Chapman, 2015. p. 282).

También existen métodos para calcular los parámetros internos a partir de los datos de placa, pero estos métodos ofrecen menos precisión que los métodos de medición.

## **Clasificación de Motores de Inducción Trifásicos**

Existen múltiples formas de clasificar a los motores de inducción trifásicos. Una de las más populares es por la norma de fabricación que puede ser europea (IEC) o estadounidense (NEMA) cuyas principales diferencias son las medidas reglamentarias de sus marcos. Sin embargo, las clasificaciones de esta sección se relacionan con el desempeño y el tipo de aplicación. Estas clasificaciones pueden ser por factor de servicio, por tipo de servicio, por eficiencia energética, por tipo de aislamiento, por grado de protección de la envolvente, por tipo de refrigeración y por relación torque velocidad.

### ***Por Factor de Servicio***

“El factor de servicio es la capacidad que tiene un motor para trabajar con una potencia superior a la nominal de manera continua sin sufrir daños” (Marathon motors, 2013. p. 37). Se puede decir que es una potencia extra que el fabricante le da a sus motores. Este factor de servicio puede ser útil para trabajar el motor al cien por ciento de su carga nominal sin temor a sobrepasarla en algún momento y sufrir averías ya que en realidad el motor tiene una capacidad superior.

La Norma NEMA MG-1 establece valores mínimos de factor de servicio para motores de corriente alterna de acuerdo con su potencia y número de polos. El factor de servicio es válido únicamente cuando el motor opera bajo valores nominales de tensión y frecuencia. El comportamiento del motor operando al nivel del valor de servicio varía un poco con respecto a su comportamiento con carga nominal como se aprecia en la Tabla 3.

**Tabla 2**

*Características de motor Baldor CEBM3546T de 1HP, 60Hz y factor de servicio de 1.15*

	Porcentaje de carga (%)						S.F.
	25	50	75	100	125	150	
Factor de potencia	0.25	0.41	0.53	0.62	0.69	0.74	0.66
Eficiencia (%)	69.1	80.5	84.2	85.9	86.3	85.9	86.1
RPM	1793	1785	1778	1770	1761	1752	1765
Corriente (A)	1.34	1.42	1.57	1.74	1.96	2.2	1.87

*Fuente.* BALDOR-RELIANCE. Baldor AC Motors. Baldor a member of the ABB group. [Online] 11 26, 2017.

<http://www.baldor.com/brands/baldor-reliance/products/motors/ac-motors>

El factor de servicio está definido en la norma NEMA MG-01, mientras que no está definido en la norma IEC. Puede suceder que un fabricante ofrezca motores con factores de servicio superiores a los requeridos por la norma.

### ***Por Tipo de Servicio***

“El tipo de servicio se define a partir de las secuencias y tiempos de funcionamiento que es capaz de mantener un motor eléctrico con carga, en vacío y en reposo” (Mora Fraile, 2003. p. 105).

La norma IEC 34-1 da las pautas para definir el tipo de servicio de un motor eléctrico de inducción. Dependiendo el tipo de servicio puede ser necesario agregar otro parámetro a su nomenclatura. El Apéndice B explica las características de cada tipo de servicio. Si un motor no especifica su tipo de servicio en la placa, se debe asumir que este es de servicio continuo (S1).

### ***Por Eficiencia Energética***

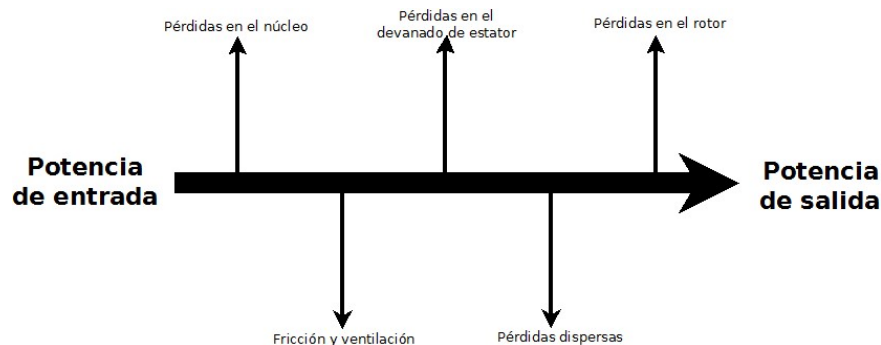
Al ser el motor de inducción trifásico un convertidor de energía eléctrica en energía mecánica, su eficiencia se considera como la relación entre la energía mecánica que este

suministra y la energía eléctrica que recibe para cumplir con su función. En el proceso de conversión de la energía existen varios tipos de pérdidas que sumados sirven para calcular la eficiencia del motor como se muestra en la Figura 2.

Las clases de pérdidas que se presentan en los motores de inducción son las pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación, pérdidas en el devanado del estator, pérdidas en el rotor y pérdidas dispersas. El Apéndice C da una breve explicación de las pérdidas que se presentan en los motores de inducción, así como la forma de reducirlas cuando se está diseñando el motor.

**Figura 2**

*Pérdidas en un motor trifásico de inducción*



*Fuente.* Obregón, J. E. (2005. 113 p). Medición a la eficiencia a motores de inducción utilizando el método de deslizamiento. [Tesis de maestría Universidad Autónoma de Nuevo León. Archivo PDF]. p. 36. San Nicolás de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150560.PDF>

Las normas que establecen la forma de medir la eficiencia en los motores de inducción trifásicos son la IEEE 112 y la IEC 60034-2-1. Para hallar la eficiencia de un motor es suficiente conocer dos de las tres variables de potencia (potencia de entrada, potencia de salida y potencia perdida). La norma IEEE 112 establece cinco métodos para hallar la eficiencia de un motor de inducción como se puede ver en el Apéndice D. Las pruebas necesarias para encontrar las

pérdidas del motor son la medición de resistencia a temperatura ambiente, el ensayo de temperatura nominal a carga nominal, el ensayo con distintos valores de carga y el ensayo sin carga con variación de tensión.

Las principales normas para clasificar la eficiencia energética de los motores de inducción son la norma NEMA MG-1 y la norma IEC 60034-30 ambas normas tienen los mismos parámetros para definir las categorías de eficiencia de los motores eléctricos de inducción, aunque las llamen con nombres ligeramente distintos como lo muestra la Tabla 4. La norma IEC ofrece una categoría adicional de eficiencia (IE4). Existe también el nivel de eficiencia IE5, pero los motores de inducción existentes en la actualidad no pueden alcanzar este nivel y por lo tanto solo aplica para motores de imán permanente y de reluctancia síncronos.

**Tabla 3**

*Tipos de motores de inducción según su eficiencia en la normatividad IEC y NEMA*

NORMA	
IEC 60034-30	NEMA MG-1
IE4 super Premium	
IE3 premium	Premium efficient
IE2 high	Energy efficient
IE1 standard	Standard efficient

*Fuente.* Autoría propia

Vale la pena aclarar que la mayor eficiencia del motor se presenta generalmente con carga al cien por ciento y es precisamente a plena carga donde se le da el valor de eficiencia a un motor eléctrico.

En el Apéndice E se pueden ver las características de tres motores de igual potencia y velocidad síncrona con distintos valores de eficiencia. Se puede apreciar que el motor de mayor



eficiencia (IE3) presenta una mayor corriente de arranque, aunque su corriente nominal es menor como es de esperarse. Los torques máximos y de arranque son notoriamente superiores a pesar de que su torque nominal es ligeramente inferior. Sin embargo, el diseño del fabricante le ha dado un factor de servicio de 1,25 al motor IE3 lo que le permite superar al motor IE1 e IE2 bajo condiciones nominales de tensión y frecuencia.

La eficiencia de los motores de inducción tiende a aumentar con su potencia nominal y los motores de dos y cuatro polos son los que presentan mayores niveles de eficiencia como lo muestra el Apéndice F. Los motores de 60 Hz presentan mayor eficiencia que los motores de 50 Hz.

Para saber que tan rentable es la compra de un motor de eficiencia superior en vez de uno de eficiencia estándar se debe tener claro el costo que se paga por kilovatio/hora y el porcentaje de tiempo en el que el motor está funcionando, así como el porcentaje de carga con el que está trabajando. Por lo general los motores que están encendidos varias horas al día generan gastos en cobro de energía superiores al costo del motor en un tiempo relativamente corto. Por ello se debe evaluar si es razonable el tiempo que tardaría en pagarse la inversión.

### ***Por Tipo de Aislamiento***

El principal factor que se tiene en cuenta para clasificar el tipo de aislamiento de un motor es la temperatura que este soporta. En 1930 V. M. Singer un ingeniero de General Electric publicó los resultados de un estudio sobre aislamiento eléctrico que efectuó a lo largo de nueve años. Empíricamente desarrollo la fórmula de los diez grados que dice que si un aislante se mantiene diez grados por encima de su temperatura nominal su vida útil se reducirá a la mitad, mientras que si se mantiene diez grados por debajo su vida útil se duplicara (Mora Fraile, 2003. p. 102).

Los tipos de aislamiento más comunes en los motores de inducción trifásicos son los expuestos en la Tabla 4 Los cuales aparecen en la norma NEMA MG-1 Tabla 33-3.

**Tabla 4**

*Principales tipos de aislamiento para motores eléctricos*

Denominación	Material	Temperatura máxima (C°)
B	Poliéster y poliimidos aglutinados con materiales orgánicos o impregnados con éstos	130
F	Fibra de mica, amianto y fibra de vidrio aglutinados con materiales sintéticos, como siliconas, poliésteres o epóxidos	155
H	Mica, amianto o fibra de vidrio aglutinados con siliconas de alta estabilidad térmica	180

*Fuente.* Fraile, Jesús. Máquinas Eléctricas. 5 ed. p. 102. Madrid: Mc Graw Hill/Interamericana de España, S.A.U., 2003. 751 p. ISBN 84-481-3913-5

El nombre de estas categorías en la norma IEC-85 corresponde a la tercera columna de la Tabla 4 ya que esta norma no denomina las categorías con letras sino con el número de la máxima temperatura en grados centígrados para el que está diseñado el tipo de aislamiento.

Para uso de motores de inducción con variadores de frecuencia la mínima categoría aceptada es la F debido a que estos motores tendrán una refrigeración más deficiente (si no son moto-ventilados) ya que su ventilador no enviará la misma cantidad de aire a velocidades menores a la nominal. Por otra parte, la señal PWM de potencia enviada por el variador produce mayores pérdidas que se traducen en calor y en ciertos instantes de tiempo tensiones elevadas que pueden deteriorar un aislamiento de categoría inferior muy rápidamente. El aislamiento típico de los motores inverter duty es clase H.

### ***Por Grado de Protección de la Envolvente***

Para poder definir el significado de grado de protección de un aparato eléctrico, primero se debe definir lo que es su envolvente. Según el vocabulario electrotécnico internacional numeral VEI 826.03-12 “La envolvente es el elemento que garantiza la protección contra ciertas influencias externas y, en todas las direcciones, la protección contra contactos directos” (Yusta J. et al, 2011. p. 286).

Las clasificaciones típicas del grado de protección de las envolventes son la IP incluida en la norma IEC 34-5 y la clasificación NEMA incluida en la norma NEMA 250.

La clasificación IP usa tres dígitos para clasificar el tipo de protección. El primer dígito puede ir de cero hasta seis e indica el grado de protección contra objetos sólidos. El segundo dígito indica el grado de protección contra líquidos y va de cero a nueve. El tercer dígito es muy poco usado e indica el grado de protección contra impactos mecánicos. En la tabla del Apéndice H se puede ver la característica que ofrece cada dígito.

En la clasificación NEMA se utiliza un dígito que puede estar solo o acompañado de una letra. Cada dígito obedece a una propiedad específica de protección como lo muestra la tabla del Apéndice I.

En algunos casos puede ser sencillo homologar de una clasificación IP a una clasificación NEMA o viceversa mientras que en otros casos no es posible realizar una homologación exacta ya que hay propiedades de una clasificación que no son tenidas en cuenta por la otra.


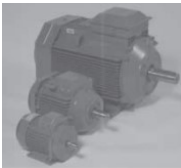




### ***Por Tipo de Refrigeración***

De manera similar a la clasificación de protección IP existe la clasificación IC para definir el tipo de refrigeración del motor eléctrico. Este tipo de clasificación está definida en la norma IEC 34-6.

Los parámetros que se tienen en cuenta en la clasificación IC son la disposición del circuito de refrigeración, el refrigerante primario que es el que absorbe el calor del interior del motor, el método de movimiento del refrigerante primario, el refrigerante secundario que es el que absorbe el calor del refrigerante primario y lo expulsa por medio de la carcasa del motor o de un intercambiador de calor y por último el método de movimiento del refrigerante secundario (NEMA MG-1, 2009, Part 6. p. 6-8).

El código IC puede ser completo o simplificado. El código simplificado omite el método de movimiento del refrigerante secundario y cuando el refrigerante primario o secundario es aire no incluye una letra para indicarlo. El Apéndice J muestra la nomenclatura del código IC y la Tabla 5 muestra algunos ejemplos.

**Tabla 5***Ejemplos de motores de acuerdo con su tipo de refrigeración*

Código	Tipo de refrigeración	Imagen
IC410	Motor totalmente cerrado sin ventilador	
IC411	Motor estándar totalmente cerrado, superficie de carcasa refrigerada por ventilador	
IC416	Motor totalmente cerrado con motor ventilador auxiliar	
IC418	Motor totalmente cerrado, superficie de carcasa refrigerada sin ventilador	
IC01	Motores abiertos	
IC31W	Entrada y salida de tubería o circuito cerrado: refrigeración por agua	

*Fuente.* ABB. Guía del motor: Información técnica básica de motores de inducción de baja tensión. p. 30. Bramley : WYBO Haas & Tomczak, 2014. 131p. ISBN 952-91-0728-5

### ***Por Diseño de Relación Torque Velocidad***

La clasificación de los motores eléctricos trifásicos de inducción por diseño de relación torque-velocidad se realiza evaluando el comportamiento del torque del motor al estar detenido y aplicársele la tensión nominal. De acuerdo con su tipo de diseño este tendrá un comportamiento determinado en su torque hasta alcanzar su velocidad nominal. El análisis de relación torque-velocidad se realiza a plena carga en arranque directo.

Los puntos fundamentales que definen la curva de relación torque-velocidad son el torque de arranque, el torque mínimo, el torque máximo y el torque nominal. Vale la pena aclarar que el torque mínimo es mayor al torque nominal, pero recibe su nombre debido a que es el torque más bajo que se presenta mientras el motor alcanza su velocidad nominal en arranque directo.

Los motores trifásicos de inducción en la norma NEMA se clasifican por su relación torque-tensión en diseños A, B, C y D. En norma IEC se clasifican en diseños N, H y D. El diseño D es igual en ambas normas, el diseño C es equivalente al diseño H y el diseño B equivalente al diseño N. En la norma IEC no hay un diseño equivalente al NEMA A.

“Los diseños nema A, B y D aplican para motores de uno a quinientos caballos mientras que el diseño C aplica para motores de uno a doscientos caballos” (Khan, 2008. p. 200).

La Tabla 6 y la Figura del Apéndice K muestran las características de los distintos tipos de diseño de motores de inducción según norma NEMA.

**Tabla 6***Características de diseños de motores según norma NEMA*

Diseño NEMA de motor	% de corriente de arranque	% de torque de arranque	% de torque mínimo	% de torque máximo	Aplicaciones
A	500-700	150	130	230	Ventiladores, sopladores, bombas centrifugas y máquinas herramienta.
B	450-500	150	120	205	Iguales a las del diseño A.
C	350-500	200	160	195	Bombas de compresión, trituradoras, horadoras, bandas transportadoras, maquinaria textil y equipos para trabajar madera.
D	300-800	280	250	275	Excavadoras, máquinas cizalladoras, troqueladoras, estampadoras, equipo de lavandería, montacargas.

*Fuente.* BHAG S, Guru y HUSEYN R, Hiziroglu. Máquinas eléctricas y transformadores. 3 ed. Mexico D.F. : Alfaomega Grupo Editor, S.A. de CV., 2002. 699p. ISBN 978-970-15-1212-8

### **Motores de Inducción Trifásicos Especiales**

Existen varios tipos de motores diseñados con características particulares que les permiten trabajar en aplicaciones o en ambientes específicos.

Existen por ejemplo motores diseñados específicamente para trabajar en ventiladores, en bombas o en aplicaciones HVAC entre otras. El caso de las bombas sumergibles es un buen ejemplo de una aplicación donde el motor debe cumplir con un diseño muy específico para la aplicación.

En otras ocasiones los motores tienen características que les permiten trabajar en ambientes particulares. Los motores explosion proof están diseñados para minimizar el riesgo de aparición de chispa que pueda provocar ignición en atmosferas explosivas o con probabilidad de ser explosivas. Los motores para extracción de humo están diseñados para trabajar con elevadas temperaturas en el ambiente.

Para aplicaciones que requieren trabajar en un variado rango de revoluciones y necesitan mantener un torque constante a cero Hertz es apropiado utilizar motores de tipo inverter duty. Estos motores cuentan con ventilación independiente del eje y su construcción garantiza funcionalidad desde cero Hertz hasta más allá de su velocidad nominal.

En la Figura 3 se pueden ver algunos tipos de motores de inducción trifásicos especiales.

### Figura 3

*Algunos motores especiales Baldor*



*Nota.* A la izquierda motores inverter duty, en el centro motores para bombas sumergibles, a la derecha motor explosion proof

*Fuente:* BALDOR-RELIANCE. Baldor AC Motors. Baldor a member of the ABB group. [Online] 04 26, 2017.

<http://www.baldor.com/brands/baldor-reliance/products/motors/ac-motors>



## Los Variadores de Frecuencia

“Los variadores de frecuencia son conocidos también con otras denominaciones como variadores de velocidad, drives, convertidores de frecuencia, etcétera. Es común también que su nombre sea abreviado como VFD (Variable Frequency Drive) o VSD (Variable Speed Drive)” (DANFOSS, 2014. p. 7).

En los textos de electrónica de potencia es común que los variadores de frecuencia sean llamados propulsores de corriente alterna.

El desarrollo de la electrónica de potencia ha permitido expandir el campo de acción de los variadores de frecuencia y disminuir su costo permitiendo que su uso aumente con el paso del tiempo.

En muchos casos la principal necesidad de adquirir variadores de frecuencia no es la variación de velocidad de los motores sino el ahorro de energía (que se logra al variar la velocidad de los motores). Los mejores ejemplos de aplicaciones con alto ahorro de energía son las bombas centrífugas y los ventiladores. En este tipo de aplicaciones se busca mantener un valor determinado de presión o caudal. En el caso de las bombas cuando no se usa un variador de frecuencia es habitual usar recirculación para mantener una presión constante, pero el desperdicio de energía es alto debido a que la recirculación implica desplazar un gran volumen de líquido solo para mantener una presión constante y sin que este desarrolle una verdadera tarea útil.

En aplicaciones donde existe una variación de carga así sea constante la velocidad, el variador de frecuencia también puede actuar ya que su consumo de energía controlando un motor a baja carga con su frecuencia nominal es menor que el del mismo motor conectado directamente a la red.

## **Ventajas y Desventajas de los Variadores de Velocidad**

Los variadores de frecuencia presentan enormes ventajas sobre otros métodos de arranque y de control de velocidad de motores de inducción como lo muestra la Tabla 7.

**Tabla 7***Ventajas del uso de variadores de frecuencia*

Ventaja	Justificación
Control de velocidad y torque en el eje del motor	<p>La variación de la frecuencia y la tensión suministradas al motor combinadas con un adecuado modo de control permiten tener un alto nivel de control en la velocidad y el torque del eje.</p>
Ahorro de energía en la mayoría de las aplicaciones	<p>Los motores que trabajan con variador de frecuencia principalmente en aplicaciones de movimiento de fluidos presentan un consumo de energía notablemente menor que el de los motores que realizan la misma actividad y están conectados a la red. Para aplicaciones que trabajan con baja carga el variador de frecuencia puede suministrar un valor de tensión más bajo al motor para tener un nivel de torque acorde con la carga y consumiendo menos energía eléctrica.</p>
Baja corriente demandada a la red en el arranque de los motores	<p>En el momento de arrancar el motor el variador de frecuencia por lo general suministra un nivel de corriente de sobrecarga entre el 110% y 160%. Sin embargo, a bajas frecuencias la tensión en los motores es baja y a pesar de la disminución de la eficiencia del variador a bajas frecuencias generalmente la corriente de arranque vista por la red es menor que la del motor a frecuencia y carga nominal.</p>
Baja corriente suministrada a los motores para un correcto arranque	<p>El arranque de motores trifásicos por variación de frecuencia implica un valor de deslizamiento prácticamente nulo en comparación con los demás tipos de arranque. Este bajo nivel de deslizamiento implica un consumo de corriente mucho menor por parte del motor.</p>
Reducción del $\cos(\varphi)$	<p>La corriente consumida por el variador de frecuencia presenta un desfase mucho menor que el de un motor conectado directamente a la red.</p>
Aumento de la vida útil de las partes mecánicas del motor	<p>El arranque menos brusco y el trabajo a menores frecuencias que la nominal producen un estrés y un desgaste mecánicos inferiores que el de los motores que trabajan sin variador de frecuencia.</p>

Facilidad para frenar los motores	<p>En casos donde sea necesario controlar la detención del motor, los variadores de frecuencia pueden controlar esta detención por medio de una rampa de desaceleración o si la inercia de la aplicación es elevada por medio de una resistencia de frenado (controlada por el chopper de frenado con el cual debe contar el variador)</p>
Facilidad para devolver energía regenerada a la red	<p>En aplicaciones donde se presenta regeneración de energía, esta se puede devolver a la red por medio de módulos regenerativos o por variadores tipo AFE (de tallas grandes) en otros casos se puede interconectar el bus DC de múltiples variadores para lograr que unos trabajen con la energía proveniente de la regeneración de otros.</p>

---

*Fuente.* Autoría propia

**Sin embargo, para la correcta implementación de los variadores de frecuencia se deben tener en cuenta los efectos negativos que produce el uso de estos y la forma de mitigarlos para el correcto funcionamiento y durabilidad del sistema de variación de velocidad. En la Tabla 8**

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (2)$$

se pueden apreciar algunos de estos efectos y la forma de mitigarlos.

**Tabla 8***Desventajas de los variadores de frecuencia y formas de mitigación de estas*

Desventaja	Forma de mitigación
Incremento notable en la distorsión armónica de la red	Uso de inductancias de red, inductancias de bus DC, filtros pasivos, filtros activos, rectificadores de más de seis pulsos según el nivel de distorsión armónica máximo requerido.
Incremento en el ruido de radiofrecuencia	Uso de filtro de radio frecuencia según el ruido aceptable por el entorno del variador.
Menor torque de arranque	Uso de cable de potencia apantallado a la salida del variador. Si la aplicación requiere una sobrecarga de arranque superior a la que puede dar el variador, este debe ser sobredimensionado.
Limitación de la distancia de cables de potencia de salida por la deformación de la señal del variador	Cerciorarse de la distancia de cable máxima aceptada por el variador y en caso de no ser suficiente, utilizar filtros de salida para aumentarla.
Daños en bobinados del motor por sobre tensiones debido a la señal PWM del variador	Uso de motores con aislamiento tipo F como mínimo o uso de filtro seno a la salida del variador.
Daño en rodamientos del motor por corrientes de modo común	Uso de filtros de salida o inversores multinivel.

*Fuente. Autoría propia***Circuitos de Potencia del Variador de Frecuencia**

El variador de frecuencia convencional tiene principalmente cuatro partes fundamentales que son el rectificador, el bus DC o circuito intermedio, el inversor y su sistema de control.

Según el diseño del variador de frecuencia se pueden encontrar otras partes adicionales como filtros activos de armónicos, módulos de frenado, inductancias de entrada, etcétera. Estas partes pueden ser parte del variador de frecuencia o estar conectadas exteriormente.

Existen también otras topologías que se encuentran en desuso o se usan muy poco como el ciclo convertidor. Por otra parte, también está el convertidor matricial que se está implementando relativamente desde hace poco tiempo y presenta una topología totalmente distinta con la misma funcionalidad del variador de frecuencia convencional.

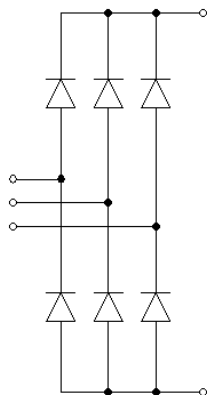
### ***El Rectificador***

El rectificador es el encargado de recibir la señal de la red y convertirla en una señal DC. Para variadores diseñados para ser alimentados directamente por tensión DC (como los variadores solares) el rectificador es omitido. Sin embargo, es posible alimentar variadores convencionales con corriente directa por el bus DC. En muchos casos existen variadores conectados a la red y a un bus DC común para que unos consuman la energía que otros regeneran. En otros casos pueden existir múltiples variadores de frecuencia con un rectificador común.

**El Rectificador no Controlado.** El rectificador más sencillo es el no controlado cuyo diagrama se ve en la Figura 4 el cual es usado en variadores de bajas potencias. Para variadores monofásicos el rectificador no controlado es también el más usado.

**Figura 4**

*Rectificador no controlado*

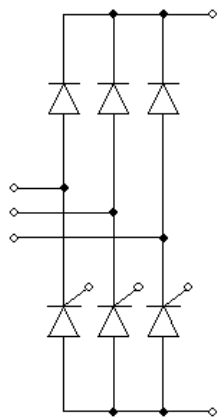


*Fuente. Autoría propia*

Un rectificador trifásico no controlado con ausencia de una línea en teoría se comportaría como un rectificador monofásico por lo que es posible alimentar un variador trifásico con una sola fase y neutro o con dos fases siempre y cuando se mantenga la misma tensión de línea. Sin embargo, para un mismo nivel de carga la corriente en los diodos del rectificador monofásico es más alta y la tensión de rizado es mucho mayor por lo que el variador debe estar sobre dimensionado para que el rectificador soporte la corriente y los condensadores del bus DC sean más grandes y no se descarguen tan rápido permitiendo una menor tensión de rizado.

Por otra parte, también es necesario que el variador no presente alguna alarma o advertencia por encontrar un elevado rizado en el bus DC ya que de todos modos este será mayor que en un variador alimentado por las tres fases. En el mercado existen variadores de frecuencia diseñados para ser alimentados tanto de forma trifásica como de forma monofásica.

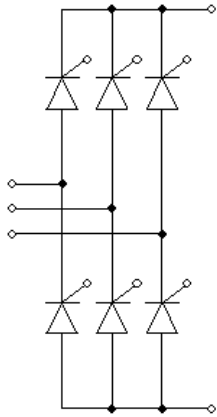
**El Rectificador Semicontrolado.** Los rectificadores semicontrolados como el de la Figura 5, controlan un ciclo en cada fase por medio de tiristores y se utilizan en variadores de mayor tamaño. Su objetivo principal es controlar la tensión que llega a los condensadores del bus DC cuando el variador se enciende y estos se encuentran descargados ya que la corriente que demandan los condensadores descargados al suministrarles toda la tensión de alimentación es bastante elevada y podría destruir el rectificador por un pulso de corriente, destruir los fusibles de protección o activar las protecciones magnéticas.

**Figura 5***Rectificador semicontrolado**Fuente. Autoría propia*

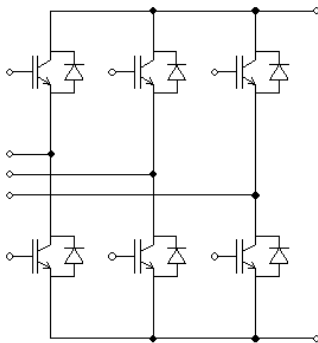
Lo que hace el rectificador semicontrolado es poco a poco incrementar el nivel de tensión hasta que los condensadores queden cargados. En este punto el rectificador semicontrolado empieza a funcionar igual que un rectificador no controlado durante el funcionamiento del variador.

**El Rectificador Controlado.** Un rectificador controlado como el de la Figura 4 puede realizar la misma tarea del semicontrolado y aun con una tensión inicial menor. Si el diseño del variador de frecuencia implica el controlar el nivel de tensión en el bus DC de forma permanente el rectificador controlado es la mejor opción ya que permite controlar la tensión en un gran rango.



**Figura 6***Rectificador controlado**Fuente. Autoría propia*

**El Rectificador AFE.** Los rectificadores tipo AFE como el de la Figura 7 cuya sigla significa Active Front End (Rectificador de frente activo) está diseñado principalmente para variadores con cargas que producen regeneración constante mente como ascensores o puentes grúa. Es usado en variadores de potencias considerables ya que su costo es elevado y solo pueden presentar retorno de inversión en estos rangos de potencia.

**Figura 7***Rectificador AFE**Fuente. Autoría propia*

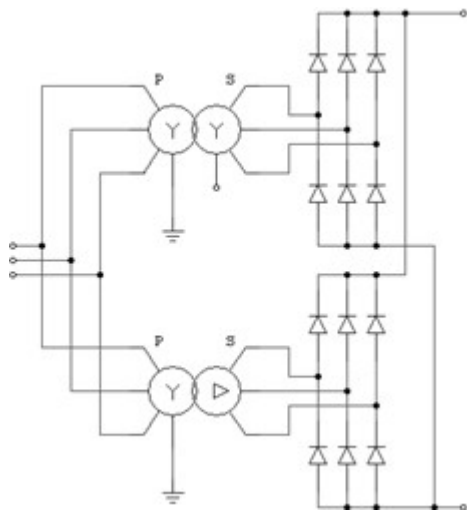
Estos rectificadores cuentan con IGBTs con diodos en paralelo en vez de tiristores o diodos solos. Este tipo de rectificadores además de devolver a la red la energía regenerada por

medio de un avanzado sistema de control de los IGBTs, también producen una distorsión armónica mucho menor que la de un rectificador convencional. La conmutación de los IGBTs al igual que en un inversor funciona por PWM.

**El rectificador de doce pulsos.** El rectificador de doce pulsos (Figura 8) usado en variadores de gran tamaño hace trabajar en serie o en paralelo dos rectificadores convencionales de seis pulsos ya sean no controlados, semi-controlados o controlados.

**Figura 8**

*Rectificador de doce pulsos*



*Fuente. Autoría propia*

Cuando los rectificadores están en serie se suma la tensión de salida de cada uno por lo que deben tener la misma capacidad de corriente de un único rectificador de seis pulsos puesto en su lugar. Si los rectificadores están en paralelo como en la Figura 8, cada uno aporta la mitad de la corriente por lo que su capacidad puede ser también la mitad de un único rectificador de seis pulsos puesto en su lugar.

En los rectificadores de doce pulsos un rectificador se alimenta por una salida en Y de un transformador y el otro por una salida  $\Delta$  (ambas con el mismo nivel de tensión de salida). Esto

produce un desfase de  $30^\circ$  entre la alimentación de cada rectificador produciendo que la salida del rectificador tenga doce ondulaciones o pulsos.

El uso del transformador necesario a la entrada del variador de doce pulsos tiene la ventaja de que puede ser alimentado con media tensión evitando el uso de otros transformadores en la subestación eléctrica. En unos casos el transformador es suministrado por el fabricante del variador y en otros casos es adquirido por aparte.

El aumento de pulsos a la salida hace que los valores de tensión mínimos en el circuito intermedio del se produzcan cada  $15^\circ$  y no cada  $30^\circ$  como en el rectificador convencional de seis pulsos. Esto hace que la tensión de rizado se reduzca ya que la tensión mínima para la salida del rectificador de seis pulsos es la tensión pico por coseno de  $30^\circ$  mientras que para el de doce pulsos será la tensión pico por coseno de  $15^\circ$ .

Por otra parte, la sumatoria de corrientes producida por cada rectificador gracias a su desfase con respecto al otro produce una onda de corriente total a la entrada del transformador que tiende a tener una forma de onda más sinusoidal y por lo tanto tiene un menor contenido armónico. Esto gracias a que los armónicos de los primeros órdenes de un rectificador se anulan con los del otro.

La metodología del rectificador de doce pulsos se puede extender usando más rectificadores de seis pulsos al tiempo por lo que en el mercado existen configuraciones de 18, 24 hasta llegar a 54 pulsos. Este tipo de configuraciones es común en los variadores de media tensión. Los transformadores tienen sus devanados para producir el desfase necesario a la entrada de cada rectificador.

Entre mayor sea el número de pulsos el rango de armónicos anulados será mayor, la señal de corriente a la entrada del transformador tenderá a ser más sinusoidal y la tensión de rizado será mucho menor.

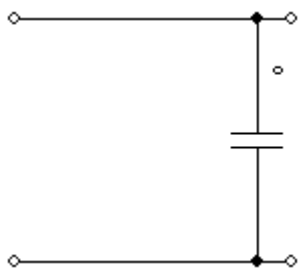
### ***Circuito Intermedio***

El circuito intermedio almacena la energía que va a requerir el inversor para crear la señal de corriente alterna que alimenta el motor. Según su diseño puede cumplir otras funciones como contener sobretensiones de cargas intermitentes, reducción de armónicos y desacoplar el rectificador y el inversor. El diseño del circuito intermedio solo es compatible con determinados tipos de rectificadores y de inversores. Los circuitos intermedios pueden ser de tensión variable o de tensión constante.

**Circuito Intermedio Básico de Tensión Constante.** Los circuitos intermedios básicos de tensión constante como el de la Figura 9 están presentes en los variadores de frecuencia de gamas bajas o de fabricantes de menor costo. Es compatible con cualquier tipo de rectificador trifásico. En variadores pequeños por su bajo costo generalmente se encuentra junto con rectificadores no controlados. La distorsión armónica de un variador con este tipo de circuito intermedio es bastante elevada si tiene rectificadores controlados, semi-controlados o no controlados por lo que puede ser necesaria la implementación de inductancias de línea en su alimentación.

**Figura 9**

*Circuito intermedio básico de tensión constante*

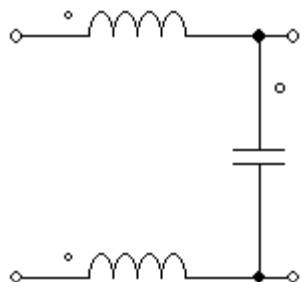


*Fuente.* Autoría propia

**Circuito Intermedio de Tensión Constante con Inductancias en el Bus DC.** Un circuito intermedio de tensión constante con inductancias en el bus DC como el de la Figura 10 es también compatible con cualquier tipo de rectificador y está presente en variadores de frecuencia de gama más alta que los del circuito intermedio sin inductancias. Los variadores de frecuencia con este tipo de circuito producen una menor distorsión armónica por lo que se pueden utilizar más variadores antes de tener que implementar un sistema de mitigación de armónicos.

**Figura 10**

*Circuito intermedio de tensión constante con inductancias en el bus DC*

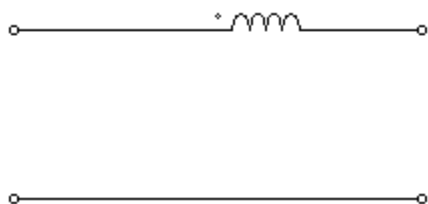


*Fuente. Autoría propia*

**Circuito Intermedio de Tensión Variable.** El circuito intermedio de tensión variable es solo compatible con rectificadores controlados y se utiliza en variadores del tipo fuente de corriente (CSI). Su bobina alisa la tensión proveniente del rectificador que presenta forma de señal sinusoidal recortada. En la Figura 11 se puede ver su esquema.

**Figura 11**

*Circuito intermedio de tensión variable*

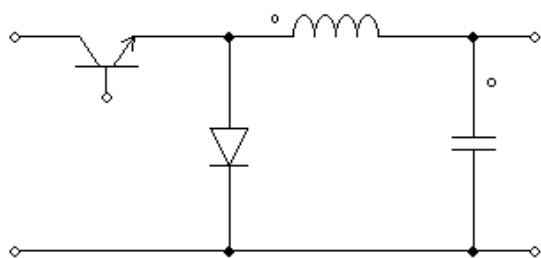


*Fuente. Autoría propia*

**Circuito Intermedio de Tensión Variable por Chopper.** El circuito intermedio con variación de tensión por chopper se utiliza en variadores de frecuencia de amplitud modulada (PAM) y es compatible con rectificadores controlados, semicontrolados y no controlados. Sin embargo, al ser capaz de regular la tensión de entrada lo ideal sería que funcione con un rectificador no controlado ya que sería innecesario regular la tensión dos veces. Su esquema se puede ver en la Figura 12.

**Figura 12**

*Circuito intermedio de tensión variable por chopper*



*Fuente.* DANFOSS. (2014. 180p). Facts Worth Knowing about Frequency Converters. p. 49.[Archivo PDF].

Ulsnaes. <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/>

En este circuito el chopper tiene un tiempo de conducción en cada ciclo de conmutación de acuerdo con la tensión deseada. La bobina y el condensador son los encargados de filtrar y alisar la señal de salida del chopper.

### ***El Inversor***

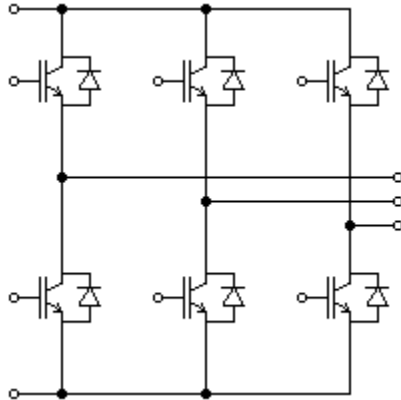
El inversor es la última etapa del variador de frecuencia y se encarga de brindar la frecuencia requerida por el proceso al motor. Cuando el inversor es alimentado por un circuito intermedio de tensión constante entonces también se encarga de regular la tensión que llega al motor por el método de ancho de pulsos

**Circuito inversor típico para variador de frecuencia.** El circuito de la Figura 13 es el más utilizado en la mayoría de los variadores de frecuencia. El tipo de modulación de este

inversor puede tener varias formas según el circuito de control. Incluso un mismo variador puede ofrecer varios tipos de modulación para escoger.

**Figura 13**

*Circuito inversor típico para variador de frecuencia*

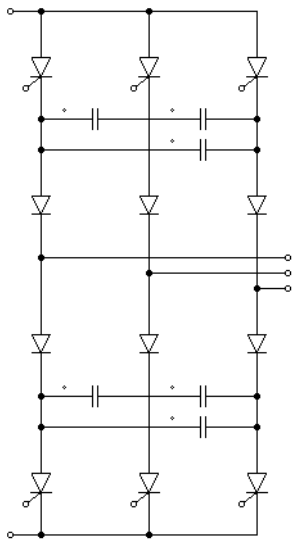


*Fuente. Autoría propia*

**Circuito típico para inversor de fuente de corriente.** El circuito inversor de la Figura 14 es compatible con cualquier tipo de circuito intermedio, pero es el único que puede ser usado en la modalidad de fuente de corriente. Por lo general este tipo de inversor se usa combinado con los circuitos intermedios de tensión variable. Su salida de tensión generalmente es PWM y su señal de corriente tiende a ser sinusoidal.

**Figura 14**

*Circuito inversor típico para variador de frecuencia de fuente de corriente*



*Fuente.* DANFOSS. (2014. 180p). Facts Worth Knowing about Frequency Converters. p. 43. [Archivo PDF].

Ulsnaes. <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/>

### **Sistema de Control de los Variadores de Frecuencia**

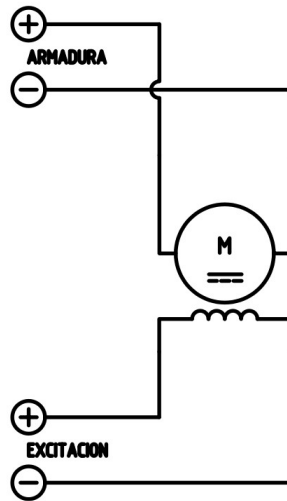
Los variadores de frecuencia presentan varios métodos de control diferentes a pesar de contar con topologías de potencia muy similares o idénticas. Un mismo variador de frecuencia por lo general cuenta con distintos métodos de control incorporados y según la gama estos pueden ser más avanzados.

Los motores de corriente continua que se utilizan en las aplicaciones que requieren variación de velocidad se destacan por la facilidad con que se puede controlar su velocidad y su torque principalmente en el caso de los motores de conexión independiente (ver esquema de la Figura 15) que tienen la cualidad de generar un campo magnético en el estator (producido por la corriente de excitación) paralelo al campo magnético de la armadura. Esta condición se denomina orientación de campo y es primordial para generar el máximo torque posible.



Figura 15

*Motor de corriente continua de conexión independiente*



*Fuente. Autoría propia*

Los métodos de control de los variadores de frecuencia buscan que el control de estas variables tenga la misma efectividad que en los motores de corriente continua emulando los campos de excitación y de armadura por medio del uso de vectores espaciales y transformadas de Clark y Park buscando tener una corriente de eje directo de estator encargada del flujo o magnetización y una corriente de eje en cuadratura de estator perpendicular a la primera y encargada del torque del eje del motor.

La función principal del circuito de control es efectuar la conmutación del circuito inversor de acuerdo con el método de control que se esté empleando. Para realizar esta tarea debe también leer datos de dispositivos externos como sensores y PLCs, realizar medición de variables del sistema y realizar la protección de sí mismo y del motor.

Las variables mecánicas que puede controlar un variador de frecuencia son la velocidad del rotor, el par del eje del motor y el ángulo del eje. El control del variador puede ser de velocidad dependiendo el par de la carga o de par dependiendo la velocidad de la carga. Por ejemplo, en un sistema de bombeo de presión constante se controla su velocidad para mantener

la presión mientras que el torque dependerá de la velocidad de la bomba y por lo tanto de la demanda del sistema. Una bobinadora por el contrario necesita mantener una tensión constante en el alambre y esto se logra controlando el torque mientras que la velocidad será la que necesite el sistema para mantenerlo.

La velocidad del rotor es una variable que se calcula en base a la tensión y frecuencia aplicadas, los datos de placa del motor, los parámetros internos del motor ya sean medidos o calculados, la corriente del motor y el coseno phi de este. Si el sistema no cuenta con un dispositivo de realimentación de velocidad este valor será aproximado y solo tendrá valores cercanos usando métodos de control avanzados.

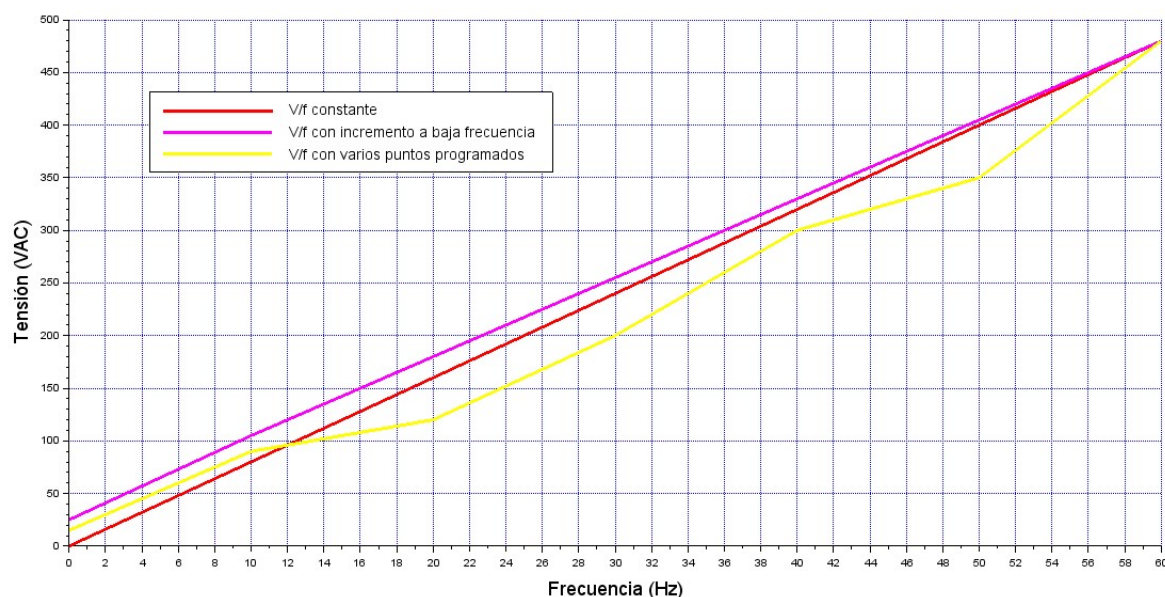
Los métodos de control de los variadores de frecuencia se pueden clasificar en control escalar, control vectorial y control directo de torque.

### ***Control Escalar***

El control escalar es el método más básico que existe para regular la velocidad de los motores. Consiste en asignar un valor de tensión a un determinado valor de frecuencia por lo que también se denomina control V/f. Esta relación tiende a ser igual a la tensión nominal sobre la frecuencia nominal del motor. Sin embargo, a bajas velocidades es necesario contar con una tensión por encima de esta relación para poder tener un nivel de torque aceptable. Los variadores de frecuencia por lo general permiten programar algunos puntos de tensión frecuencia para tener el comportamiento deseado. En la Figura 16 se observan distintos tipos de relaciones V/f.

**Figura 16**

Relaciones  $V/f$  para un motor de 60 Hz, 480 VAC



Fuente. Autoría propia

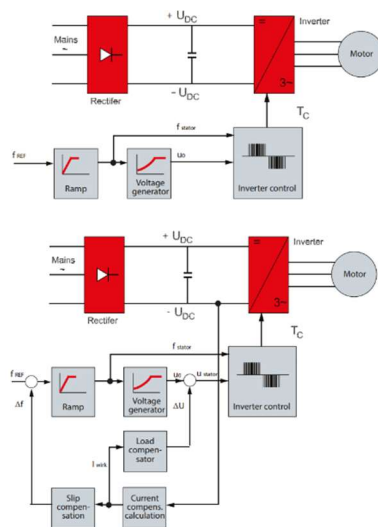
El control escalar tiene el inconveniente de no tener en cuenta el torque por lo que es bastante deficiente si se necesita controlar esta variable. Por otra parte, no es muy preciso en el control de la velocidad por lo que no se puede usar en aplicaciones que requieran un alto nivel de precisión.

Uno de los campos en donde es conveniente aplicar el control escalar es en el manejo de varios motores en paralelo con un solo variador (Ver ejemplos del capítulo Ejemplos Y Aplicaciones De Sistemas De Variación De Velocidad Por Frecuencia) ya que con los demás métodos de control el variador necesita crear un modelo del motor mientras que esto es imposible con varios motores en paralelo aun si son iguales. También es idóneo para usarse en aplicaciones de aumento de potencia de motor (Ver ejemplo del capítulo Ejemplos Y Aplicaciones De Sistemas De Variación De Velocidad Por Frecuencia).

El control escalar o V/f puede ser de modo básico o con compensación (Ver Figura 17). En modo básico el variador no realiza medición de variables eléctricas por lo que no se compensa el deslizamiento y la velocidad del eje puede oscilar entre la velocidad de sincronismo y la velocidad nominal del eje según la carga. Al no realizarse mediciones eléctricas no es posible proteger el motor por lo que esta tarea la efectuaría un interruptor termomagnético o fusibles aguas arriba del variador.

**Figura 17**

*Diagramas de control V/f*



*Nota:* Arriba control V/f básico. Abajo V/f compensado.

*Fuente:* DANFOSS. (2014. 180p). Facts Worth Knowing about Frequency Converters. p. 67. [Archivo PDF].

Ulsnaes. <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/>

El control escalar con compensación por el contrario realiza una medición de corriente en el bus DC del variador de frecuencia y la compara con la corriente nominal del motor que se programó para poder calcular el porcentaje de carga y así compensar el deslizamiento. De esta forma se realimentan la frecuencia de referencia y la relación V/f programada.

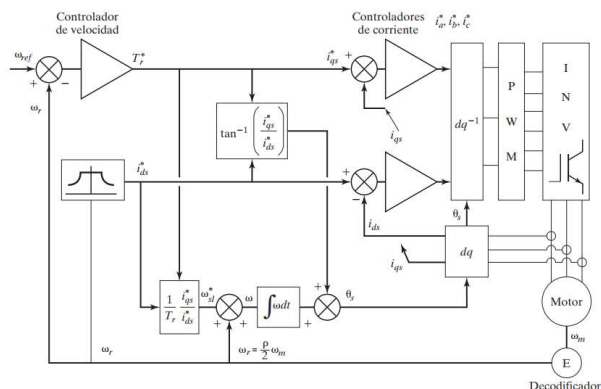
## Control Vectorial

El control vectorial se denomina así por hacer uso de vectores espaciales para poder mantener una velocidad y torque deseados, así como una rápida respuesta ante variaciones de carga. Existen varios tipos de control vectorial y en ocasiones los fabricantes tienen sus propias versiones modificadas. Sin embargo, el más común es el control vectorial indirecto de campo orientado conocido por la sigla FOC (Field Oriented Control). Se le dice indirecto porque no mide directamente el vector de flujo, sino que lo estima en base a las corrientes medidas en el estator y la velocidad del rotor. Esta velocidad puede ser medida por un encoder o resolver o se calcula en base al modelo del motor.

“La finalidad de la modulación vectorial aplicado a las máquinas asincrónicas es lograr un tipo de control lineal, independizando a la corriente que produce el flujo magnético, de la corriente que produce el par del motor” (Vernavá et al. 2008, p.3). En la Figura 18 se observa un diagrama de control vectorial con realimentación de velocidad.

**Figura 18**

*Esquema de control vectorial por flujo de campo con realimentación de velocidad*



*Fuente.* Rashid, Muhammad. *Electrónica de Potencia*. Traducido por Rodolfo Navarro Salas, p. 792. 4 ed. Mexico D.F. : Pearson Education, 2015. 946p. ISBN 978-607-32-3328-6.

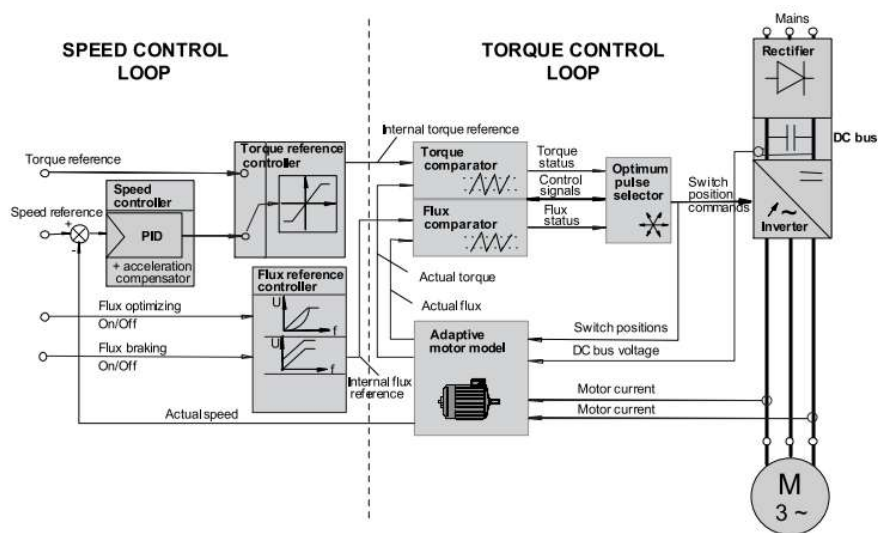
## Control Directo de Torque

El control directo de torque DTC es un método bastante particular que se destaca por no trabajar con PWM sino con una tabla de disparo de los IGBTs que según las mediciones realizadas decide cual es la mejor configuración de disparo que se puede realizar para mantener el torque o la velocidad deseados. En la Figura 19 se observa su esquema de control.

Este método ha sido desarrollado únicamente por el fabricante ABB ya que esta empresa se creó en 1988 con la fusión de dos grandes empresas del sector eléctrico mundial una de las cuales contaba con la patente del control directo de torque. Al vencerse la patente en la década del 2000 es muy posible que otros fabricantes hayan tomado tecnología DTC para sus inversores, pero en el mercado solo se reconoce a ABB en la fabricación de variadores con control directo de torque.

Figura 19

Esquema de control DTC en lazo abierto



Fuente. ABB. (2014). Libro de guías Técnicas de accionamientos de CA [Archivo PDF]. ABB Library:

[https://library.e.abb.com/public/dd0c813e2011033ec1257d4e00406241/TechnicalGuideBook\\_1\\_10\\_ES\\_REVH.pdf](https://library.e.abb.com/public/dd0c813e2011033ec1257d4e00406241/TechnicalGuideBook_1_10_ES_REVH.pdf)

El corazón del DTC es el bucle de control de par, donde un modelo de motor adaptativo avanzado aplica algoritmos matemáticos sofisticados para predecir el estado del motor. El modelo de motor predice con exactitud las principales variables controladas, tales como el flujo del estator y el par motor, tomando como entradas las corrientes de las fases del motor y las mediciones de tensión del bus de CC, así como los estados de los transistores de conmutación de potencia del convertidor. El modelo de motor también calcula la velocidad del eje. La compensación de temperatura ayuda a mejorar la exactitud del cálculo sin necesidad de un encoder (ABB, 2016, p. 3-4).

Entre las principales ventajas del control directo de par se encuentran el control preciso de par y velocidad incluso a bajas velocidades, manejar un nivel de precisión mayor que el control vectorial sin necesidad de acudir a dispositivos de realimentación de velocidad.

### **Variadores de Frecuencia para Aplicaciones Específicas**

Existen variadores de frecuencia que están diseñados para aplicaciones específicas como bombeo, refrigeración, elevadores, etcétera. En muchos casos existen marcas con portafolios de productos para un solo tipo de industria que comercializan variadores hechos por fabricantes especializados de variadores. Es por eso por lo que en muchos casos se ven variadores iguales de distintas marcas.

Los variadores de frecuencia para aplicaciones especiales cuentan con menús que permiten configurar y optimizar el funcionamiento de la aplicación para la cual están enfocados. También cuentan con compatibilidad para trabajar con los buses de campo más utilizados en su tipo de aplicación. Los variadores para uso específico generalmente son de gamas medias y altas ya que las gamas bajas por lo común son de uso general.

Los variadores enfocados en bombeo tienen menús que permiten configurar fácilmente sistemas de presión o caudal constante, coordinar la alternación o adición de bombas y cuentan con rampas de arranque y parada que eliminan el golpe de ariete.

Los variadores diseñados para sistemas de elevación deben contar con un sistema que permita disipar la energía regenerada o devolverla a la red y un hardware que permita fácil conexión con encoders o que permita trabajar sin estos de forma satisfactoria.

En otros casos las características físicas con que cuentan los variadores les permiten funcionar de forma descentralizada en entornos hostiles como pueden ser aplicaciones de minería donde suelen ser necesarios los variadores con protección IP66.

En áreas estériles de industrias de alimentos o laboratorios farmacéuticos donde la limpieza se realiza con agua a presión se necesita también una protección IP66, además en este caso los variadores deben tener una superficie lisa que evite la acumulación de impurezas y facilite la limpieza para poder trabajar dentro de áreas de producción que manejen algún grado de inocuidad o para trabajar en áreas estériles.

También existen variadores refrigerados por agua para ambientes que manejan temperaturas elevadas donde la temperatura del aire no es idónea para enfriar equipos.

### **Tipos de Aplicaciones Según Sobrecarga Y Par**

Las aplicaciones de variación de velocidad tienen dos características que deben ser muy tenidas en cuenta a la hora de seleccionar un variador de frecuencia. Estas características son el tipo de sobrecarga y el tipo de par.

#### ***Tipos de Sobrecarga***

Las aplicaciones de variación de velocidad se destacan por necesitar una capacidad de sobrecarga para lograr vencer la inercia al arranque. Los fabricantes de variadores de frecuencia



generalmente ofrecen equipos con capacidad de sobrecarga de 110% para aplicaciones de arranque liviano y 150% para aplicaciones de arranque severo. Los variadores de uso general son los que se ofrecen en el mercado para trabajar con los dos tipos de sobrecargas. En la Figura 20

**Figura 20**

*Placa de datos de variador de frecuencia de uso general*



*Fuente. Autoría propia*

Este valor de sobrecarga puede durar un máximo de un minuto y la sobrecarga puede ser mayor durante un tiempo más corto según las indicaciones del fabricante. La sobrecarga no siempre debe presentarse en el arranque ya que si la aplicación lo exige puede haber una sobrecarga en cualquier momento. La magnitud de la sobrecarga es un parámetro programable en el variador de frecuencia. El fabricante suministra información de cada cuanto se puede hacer una sobrecarga.

La capacidad de sobrecarga depende de las características de los IGBTs del inversor. Es por eso por lo que se dice que el IGBT tiene una curva de corriente y que el consumo de corriente siempre debe estar por debajo de esta curva. En casos en que la exigencia de sobrecarga de arranque sea aún mayor al 150% el variador de frecuencia debe sobredimensionarse.

Por lo general un variador con capacidad de sobrecarga de 150% tiene el mismo circuito de potencia que uno con capacidad de sobrecarga de 110% del siguiente valor comercial de potencia.

Por lo general el arranque liviano se presenta en bombas centrífugas, ventiladores con dámper cerrado o compresores que arrancan sin carga. Existen aplicaciones que pueden arrancar con un variador de frecuencia de arranque ligero si no cuentan con carga en el momento del arranque como es el caso de una banda transportadora. Sin embargo, el variador de frecuencia debe estar dimensionado para el peor escenario posible y este es arrancar con carga después de un corte de energía o la activación de una parada de emergencia, por ejemplo. En estas condiciones se deberá arrancar con carga, aunque no sea una parte rutinaria del proceso.

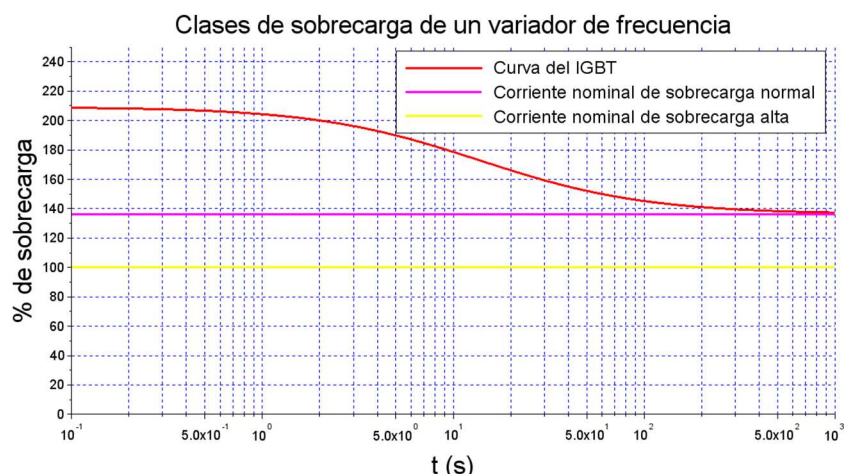
En la Figura 21 se puede observar una curva de IGBT con alta capacidad de sobrecarga de 200% durante dos segundos y 150% durante un minuto. La sobrecarga normal es de 146% durante dos segundos y 110% durante un minuto.

Se puede observar que la curva del IGBT converge a la corriente nominal de sobrecarga normal por lo que se puede deducir que después de pasar una sobrecarga el variador trabajará más exigido en corriente nominal de sobrecarga normal que si trabajara en corriente nominal de alta sobrecarga. Por lo tanto, en modo sobrecarga alta se tiene una mayor reserva de sobrecarga sacrificando corriente máxima de funcionamiento continuo mientras que en sobrecarga normal se tiene poca reserva de sobrecarga, pero una mayor capacidad de corriente en funcionamiento continuo.

En realidad, en funcionamiento en modo sobrecarga alta el variador de frecuencia se podría sobrecargar un 136.36% en cualquier momento y por tiempo indefinido alcanzando el nivel de corriente nominal de sobrecarga normal a menos que haya una restricción en la

**Figura 21**

*Ejemplo de curva de IGBT y tipos de sobrecarga*



*Fuente.* Autoría propia

### ***Clasificación de aplicaciones por tipo de par***

El torque y la potencia de los motores eléctricos alimentados por variadores de frecuencia tienen un comportamiento desde la frecuencia mínima hasta la frecuencia nominal (modo flujo constante) y otro comportamiento al superar la frecuencia nominal (modo debilitamiento de campo) (Rashid, 2015. P. 777).

En los ejes de los motores la potencia se calcula en base al torque y las revoluciones. En rangos de frecuencia menores o iguales a la frecuencia nominal del motor estas magnitudes presentan un comportamiento similar al de la corriente y frecuencia de los variadores. La tensión de salida del variador tiende a tener una relación lineal con la frecuencia principalmente si se está trabajando a plena carga. Por lo tanto, se puede establecer que la tensión tiende a tener una relación lineal con la velocidad angular del eje del motor.

Sí la tensión aumenta linealmente con la frecuencia se espera que a frecuencia nominal se alcance la tensión nominal. Por eso más allá de la frecuencia nominal la tensión no puede seguir

aumentando. Si se está trabajando a plena carga entonces a frecuencia nominal también se alcanza la corriente nominal y por lo tanto la potencia y el torque nominales del motor.

En valores superiores a la frecuencia nominal el variador puede mantener la tensión y la corriente máximos por lo tanto se puede hablar de una potencia constante. Mecánicamente también hay una potencia constante, pero al aumentar las revoluciones linealmente con la frecuencia, obligatoriamente el torque debe variar de forma inversamente proporcional a la velocidad para mantener una potencia constante.

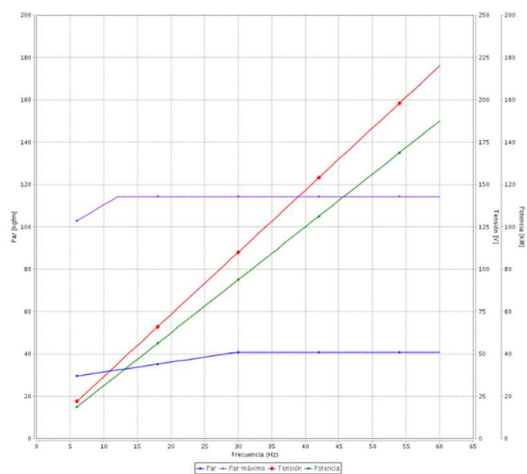
Las aplicaciones de variación de velocidad pueden clasificarse de cuatro formas según la demanda de torque que tengan a medida que aumenta la velocidad. Estas cuatro clases son torque variable cuadrático, torque variable lineal, torque constante y potencia constante.

Vale la pena aclarar que una misma aplicación tiene varias componentes que pueden ser de distintos tipos. Por ejemplo, un automóvil a altas velocidades tiende a comportarse como una aplicación de torque variable cuadrático ya que la mayor parte de su energía la gasta en vencer la oposición del aire. Sin embargo, a bajas velocidades esta fuerza es despreciable y la mayor parte de la energía se gasta en vencer la fuerza de rozamiento de las llantas, los componentes mecánicos y en vencer la inercia si se está acelerando.

En la Figura 22 se pueden observar las curvas reales de torque, tensión y potencia suministradas por el fabricante de un motor. La Figura 23 así como la Figura 24, la Figura 25 y la Figura 26 no involucran la sobrecarga de arranque, el nivel de tensión que debe llegar al motor en valores cercanos a cero Hz ni la disminución de la eficiencia de los variadores a frecuencias bajas.

**Figura 22**

Curvas de desempeño con variador de motor WEG W22 IE3 200 HP



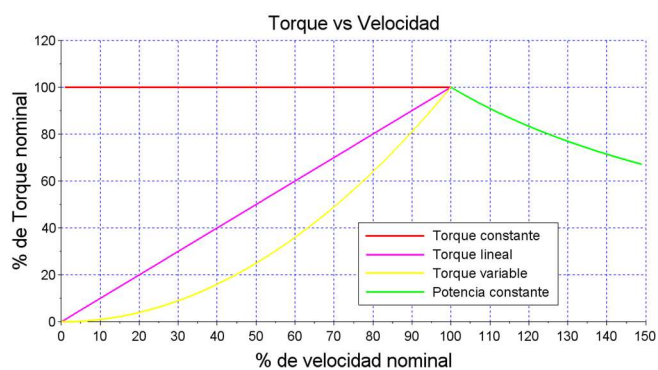
Fuente. WEG. (s.f.). Selección de motores eléctricos. WEG:

[https://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_sel\\_web.asp](https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp)

En la Figura 23 se puede observar una aproximación del comportamiento del torque con respecto a la velocidad en los distintos tipos de aplicaciones.

**Figura 23**

Curvas de torque vs velocidad



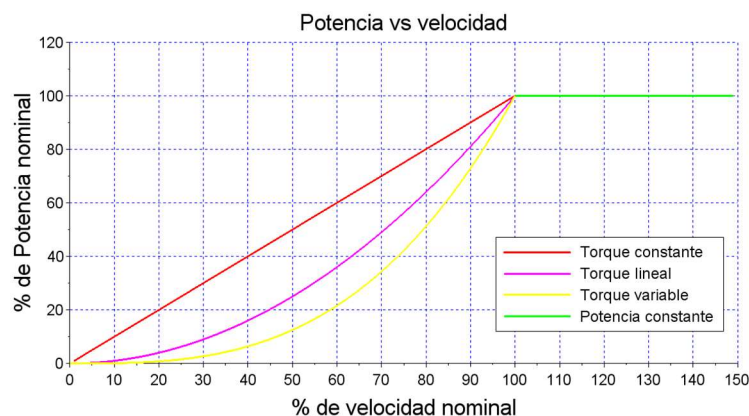
Fuente. Autoría propia

Se puede observar que las aplicaciones de torque constante son las que presentan una mayor exigencia del motor en todo el rango de velocidades.

En la Figura 24 se puede observar como las aplicaciones de torque variable disminuyen muy notablemente su potencia con respecto a la velocidad y queda claro por qué se presenta el ahorro de energía con estas aplicaciones usando variadores de frecuencia.

**Figura 24**

*Curvas de potencia vs velocidad*

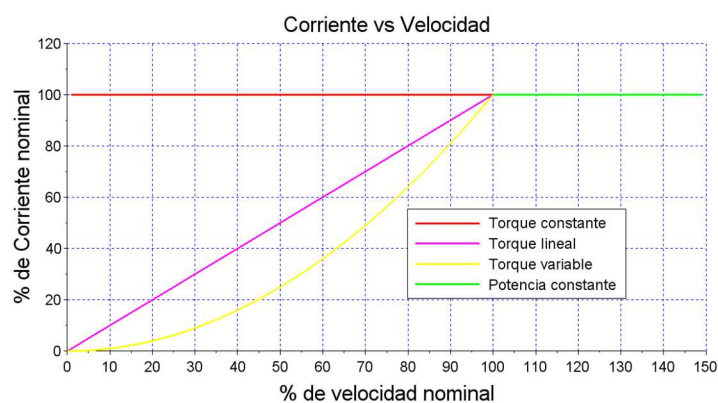


*Fuente. Autoría propia*

En la Figura 25 se observa como la corriente tiene un comportamiento muy similar al torque si se compara con la Figura 23 en todas las aplicaciones menos en las de potencia constante.

**Figura 25**

*Curvas de corriente vs velocidad*

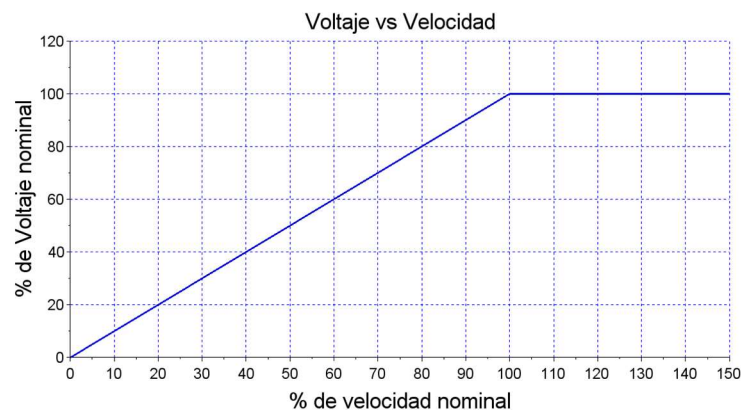


*Fuente. Autoría propia*

La Figura 26 asume una relación constante de tensión-frecuencia como en el control escalar. En modo ahorro de energía el variador optimiza el valor de tensión para que la potencia tenga el menor valor posible de acuerdo con la carga.

**Figura 26**

*Comportamiento de la tensión con respecto a la velocidad*



*Fuente.* Autoría propia

**Aplicaciones de Torque Variable Cuadrático.** Las aplicaciones de torque variable cuadrático son aquellas que presentan un incremento cuadrático del torque con respecto a la velocidad de giro del motor. Sí un motor está trabajando en condiciones nominales de velocidad y carga y se decide disminuir su velocidad entonces el torque descenderá cuadráticamente y por lo tanto la potencia lo hará de forma cubica. Es por ello por lo que este tipo de aplicaciones son las que permiten el mayor ahorro de energía al utilizar variadores de frecuencia.

En este tipo de aplicaciones generalmente se alcanzan los valores nominales de carga a la frecuencia nominal y por eso no es común trabajar más allá de este valor.

Las aplicaciones típicas de torque variable cuadrático son las bombas centrífugas y los ventiladores.

**Aplicaciones de Torque Variable Lineal.** Las aplicaciones de torque variable lineal son las que presentan una variación lineal del torque con respecto a la velocidad. Esta forma de

variación del torque produce una variación cuadrática de la potencia por lo que también se presenta un ahorro de energía si se disminuye la velocidad, aunque en menor cuantía que las aplicaciones de torque variable cuadrático. Las aplicaciones típicas de torque lineal son los mezcladores y las bombas volumétricas con tornillo de Arquímedes.

**Aplicaciones de Torque Constante.** Las aplicaciones de torque constante son las que presentan el mismo nivel de torque en cualquier velocidad produciéndose un incremento lineal de la potencia con respecto a la velocidad. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son bandas transportadoras y elevadores.

**Aplicaciones de Potencia Constante.** Las aplicaciones de potencia constante son las que presentan un par inversamente proporcional a la velocidad. Estas aplicaciones tienen un rango de funcionamiento de velocidad relativamente corto ya que exigen la corriente y la tensión máximos del variador de frecuencia y esta condición solo se puede dar en la región de modo de debilitamiento de campo que va desde la frecuencia nominal hasta aproximadamente el 150% de esta. Este tipo de variación de torque está presente en enrolladoras y en máquinas herramienta. En estas últimas es frecuente realizar los cambios de velocidad por transmisiones mecánicas más que por variadores de frecuencia ya que estas permiten mayores rangos de velocidad.

### **Variadores de Media Tensión**

Los variadores de media tensión se utilizan en aplicaciones de altas potencias (generalmente desde 250 HP) y su diferencia con los variadores de baja tensión va más allá del tamaño, potencia y nivel de tensión manejado ya que por un lado los variadores de media tensión presentan varias topologías distintas según el fabricante y por el otro deben cumplir con condiciones de generación de armónicos y forma de señal de alimentación del motor más estrictas que para los variadores de baja tensión. En ocasiones los variadores de media tensión se



utilizan solo para arrancar los motores y por medio de un control de sincronismo el motor se desconecta del variador y se conecta a la red pudiendo servir un solo variador para arrancar varios motores (uno a la vez).

Existe un rango de potencias en que los variadores de media tensión y baja tensión (Aproximadamente desde los 250 HP a los 1250 HP) se traslapan y se debe tomar la decisión sobre cuál de los dos usar. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Los motores síncronos compiten en estos niveles de potencia con los motores de inducción. Por lo general los variadores de media tensión pueden manejar ambos tipos de motores o requieren pequeños cambios de hardware para poder hacerlo.

Un factor muy importante para tomar la decisión sobre si usar variador de media o de baja tensión es la distancia desde el variador hasta el motor ya que los variadores de baja tensión de potencias elevadas manejan corrientes bastante altas que necesitan bastantes conductores de cobre de calibres considerables y para distancias largas el costo en conductores es bastante considerable aun si el variador y el motor de baja tensión son más económicos que los de media tensión.

Siempre se debe tener en cuenta que un flujo de potencia que pueda estar en el rango de media y baja tensión implicará una menor inversión en conductores de media que en conductores de baja tensión ya que la cantidad de cobre prima para definir el costo de los conductores aun por encima del apantallamiento y aislamiento con que deben contar los conductores de media tensión.

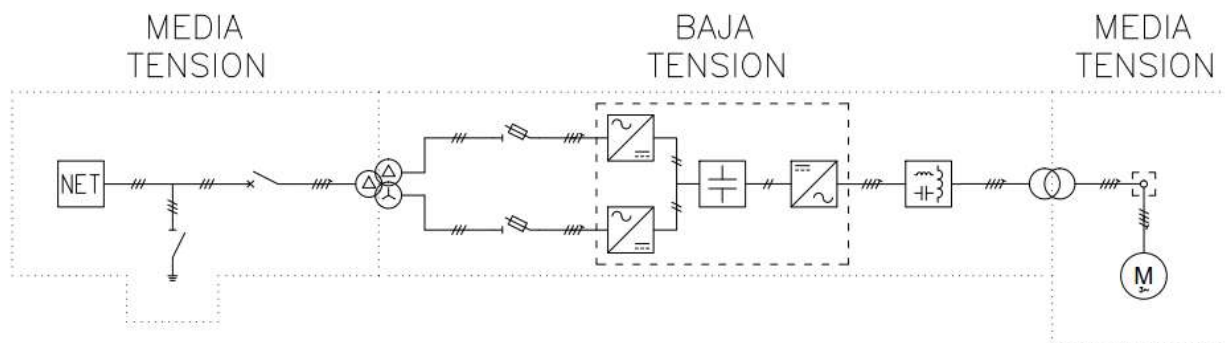
Los variadores de media tensión se pueden clasificar en variadores con celdas de baja tensión y variadores con semiconductores de media tensión. También existen sistemas HI-LO-HI que trabajan en media tensión con variadores de baja tensión.

### ***Sistemas HI-LO-HI***

Los sistemas HI-LO-HI se usan principalmente en campos petroleros. Reciben este nombre ya que se alimentan en media tensión, reducen la tensión para variar la frecuencia y elevan nueva mente para alimentar el motor. Estos sistemas se utilizan principalmente en las potencias más bajas de motores MT (media tensión). Si el sitio de instalación no está conectado a una red de media tensión pueden conectarse a un generador BT (baja tensión) para formar un sistema LO-HI. La Figura 27 contiene el plano unifilar con los principales componentes de un sistema HI-LO-HI.

**Figura 27**

*Comportamiento de la tensión con respecto a la velocidad*



*Fuente.* Autoría propia

La red que alimenta el sistema HI-LO-HI por lo general es de 13.8 kV. Esta alimenta un transformador de 12 pulsos protegido por un interruptor automático. El rango de potencias que se maneja en sistemas HI-LO-HI permite que la distorsión armónica producida por un rectificador de 12 pulsos esté en un rango aceptable. El transformador de 12 pulsos cumple con dos funciones que son pasar de MT a BT y producir una salida de seis fases con desfase de 30 °C entre cada una. De esta forma se alimenta el rectificador de 12 pulsos. Este rectificador puede contar con fusibles ultrarrápidos a la entrada. El inversor del variador es igual al de un variador

convencional BT y debe programarse para funcionar en control escalar con una rampa programada en varios puntos.

La salida del variador por ser PWM primero debe pasar por un filtro seno que convierte esta señal en senoidal. Esta señal senoidal entra a un transformador elevador de frecuencia variable que da el nivel de tensión que requiere el motor. Los elementos que manejan BT (transformadores, variador y filtro seno) se encuentran relativamente cerca entre sí. La distancia al motor si puede ser elevada.

Los sistemas HI-LO-HI tienen un flujo de potencia unidireccional por lo que solo sirven para aplicaciones no regenerativas. El arranque de los motores no se puede hacer desde 0 HZ porque produciría un cortocircuito en el transformador elevador. Por lo tanto, se debe arrancar desde la frecuencia más baja aceptada por el transformador. Esto produce un pico de corriente que debe ser soportado por el variador de frecuencia. Este pico de corriente también implica que la aplicación preferiblemente debe producir una baja sobrecarga de arranque.

Las principales ventajas de los sistemas HI-LO-HI son el menor costo en comparación con variadores de media tensión, el menor costo del servicio técnico y la posibilidad de diseñarse para cualquier tensión de alimentación y cualquier tensión de motor. Por otra parte, los transformadores y el filtro seno son elementos pasivos poco susceptibles a falla si se dimensionan e instalan correctamente y se les realiza el debido mantenimiento preventivo.

El variador de frecuencia es el único elemento activo del sistema y es más sencillo de reparar que el variador de media tensión, sus repuestos son más económicos y por lo general se pueden obtener más rápido. Incluso si la aplicación es crítica se puede tener un variador de baja tensión de repuesto.

Las principales desventajas del sistema HI-LO-HI son su baja eficiencia ya que el transformador elevador y el filtro seno en conjunto aportan un nivel considerable de pérdidas. Un variador de media tensión al no necesitar de estos elementos ofrece un nivel de eficiencia superior.

Por otra parte, los sistemas HI-LO-HI al no manejar directamente el motor con el variador hacen imposible el uso de control vectorial por lo que se debe recurrir al control escalar con las desventajas que esto implica.

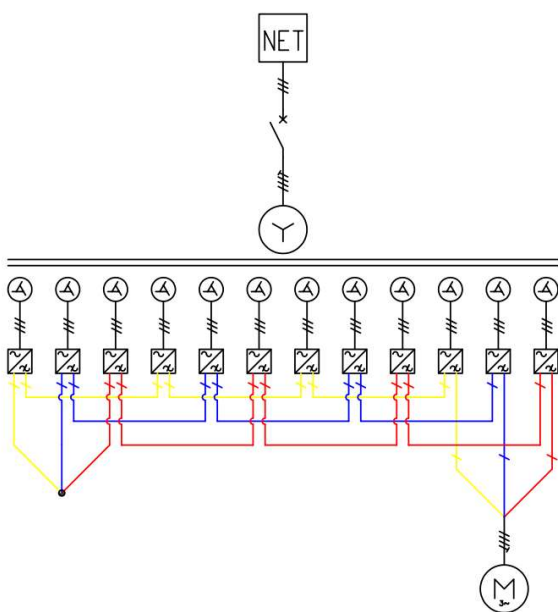
En conclusión, el sistema HI-LO-HI es ideal para sitios donde es imposible realizar paradas de mantenimiento demasiado prolongadas y donde no es posible obtener de manera rápida repuestos. Por lo que se sacrifica eficiencia energética para bajar el riesgo de paradas de producción.

### ***Variadores de Media Tensión con Celdas de Baja Tensión***

Los variadores de media tensión con celdas de baja tensión son los más comunes de encontrar fuera de los campos petroleros. Generalmente se utilizan en aplicaciones no regenerativas y su número y tamaño de celdas y la topología del transformador dependen de la potencia y tensión que se deben manejar. El esquema de la Figura 28 muestra un variador de frecuencia MT con 12 celdas de baja tensión.

**Figura 28**

Diagrama unifilar de VFD MT con celdas BT



Fuente. Autoría propia

Este tipo de variadores se pueden diseñar para cualquier valor típico de alimentación de media tensión. El transformador de estos variadores produce varias salidas en baja tensión con salidas desfasadas. Las celdas usan semiconductores de potencia de las mismas características de los que tienen los variadores de baja tensión

El esquema de la Figura 28 debe tener un transformador de 24 pulsos con desfase de  $30^\circ$  para poder alimentar las 12 celdas. Si la salida máxima de cada celda es de 690 VAC, la suma de las cuatro celdas en serie de cada fase da 2760 VAC que es un valor en el rango de media tensión. Como las fases tienen un punto común la tensión que alimenta el motor es igual a  $\sqrt{3} \cdot 2760 \text{ VAC} = 4780 \text{ VAC}$  lo cual es suficiente para alimentar un motor de 4160 VAC que es un valor típico de media tensión.

La corriente de cada celda debe ser igual o mayor a la corriente nominal del motor. tensión se muestra en la Ecuación (13):

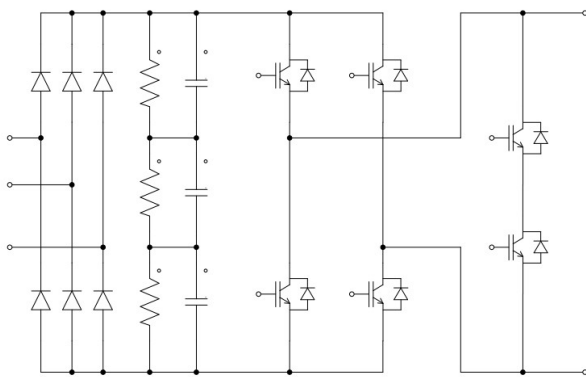
$$V_c = \frac{V_m}{n\sqrt{3}} \quad (13)$$

Donde  $V_c$  es la tensión máxima de salida de la celda,  $V_m$  es la tensión nominal del motor y  $n$  es el número de celdas por fase. En este mismo orden de ideas con seis celdas de 690 VAC por fase se podría alimentar un motor de 6600 VAC y con 12 por fase se podría alimentar un motor de 13800 kV. Como se observa en la Figura 28 las celdas son de entrada trifásica y salida bifásica. Es decir, son puentes H por lo que esta topología también se puede llamar variador de puente H en cascada.

Como las celdas se conectan en serie entonces se puede hablar de que cada celda pertenece a una fase. Cada celda tiene su propio bus DC que para el caso de una celda de 690 VAC puede tener una tensión rms de 932 VDC. Las celdas común mente tienen tres condensadores en serie en el bus DC ya que estos condensadores generalmente tienen capacidad de 400 o 450 VDC. La Figura 29 muestra el circuito de potencia de una celda de baja tensión.

**Figura 29**

*Circuito de celda de baja tensión*



*Fuente.* Autoría propia

*Nota:* Los dos IGBTs de la derecha sirven para hacer bypass si la celda falla.

Las celdas están controladas por medio de fibra óptica ya que con cables habría más vulnerabilidad en estas al ruido de radiofrecuencia. Cada celda recibe órdenes del controlador

central y envía información de sí misma. Cuando una celda falla emite una alarma y el controlador hace que se activen los IGBTs de bypass de la celda que presenta el daño y de las celdas que tienen la misma posición en las otras fases. De esta forma se puede seguir trabajando con porcentaje de potencia reducido antes de detener el variador para reemplazar la celda. Esta es una de las ventajas que ofrece esta topología de variador de media tensión.

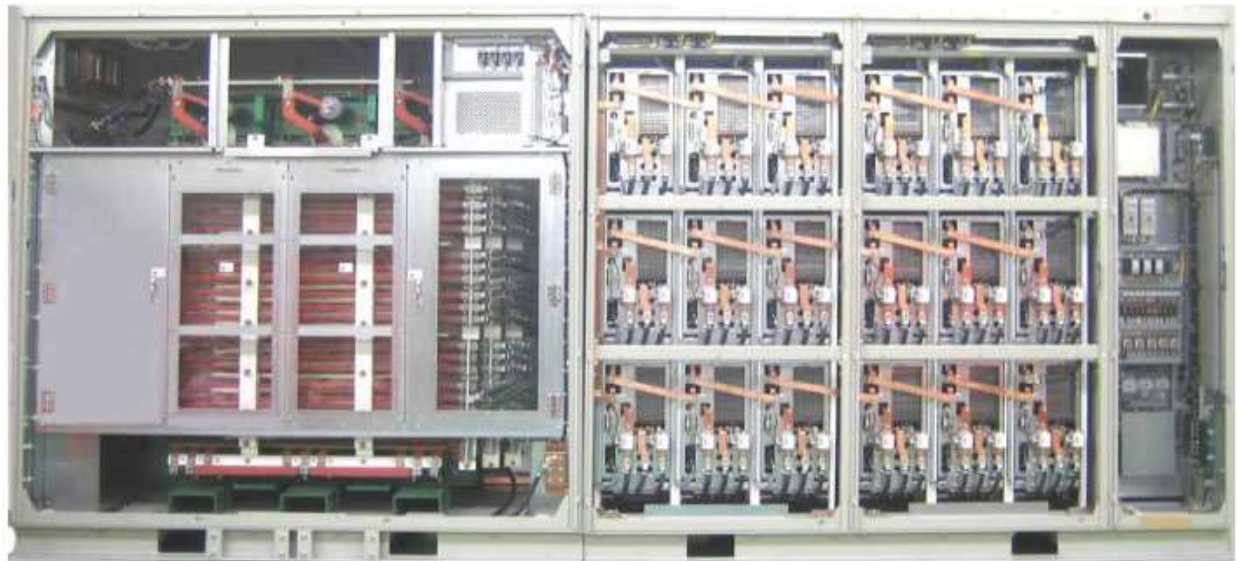
Las celdas de cada fase no están sincronizadas en su conmutación, sino que tienen un desfase entre ellas para poder ofrecer una salida equivalente a la de un inversor multinivel donde el número de niveles es igual al doble del número de celdas en serie más uno. Esta forma en la señal de salida es mejor para poder preservar el aislamiento del motor y reducir las corrientes de modo común.

Las celdas no tienen polo a tierra, sino que se acomodan sobre una estructura de vaquela para evitar arcos eléctricos ya que la diferencia de potencial que manejan con respecto a tierra es mayor a su tensión de operación principalmente en las celdas que están más cerca al motor. Cada celda cuenta con protección por fusibles en dos de sus tres fases de entrada.

En la Figura 30 se observa un variador de media tensión con celdas de baja tensión instaladas en una estructura de vaquela. Las líneas de alimentación llegan por abajo y la línea del motor está en la parte superior. A la izquierda se encuentra el transformador multipulsos que alimenta a todas las celdas.

**Figura 30**

*Celdas de baja tensión instaladas en variador MT*



*Fuente.* TMEIC. (2011). Medium voltage drive evolution. p. 20. [Archivo PDF]. TMEIC Corporation.

<https://www.tmeic.com/sites/default/files/assets/files/library/MV%20Drive%20Evolution%20Brochure-2019web.pdf>

### ***Variadores con semiconductores de media tensión***

Los variadores con semiconductores de media tensión son un conjunto de variadores que presentan distintas topologías y cuentan con semiconductores con elevados valores de aislamiento que, aunque no reciben toda la tensión de entrada o salida de los variadores, si presentan diferencias notables con los semiconductores de potencia usados en los variadores de baja tensión.

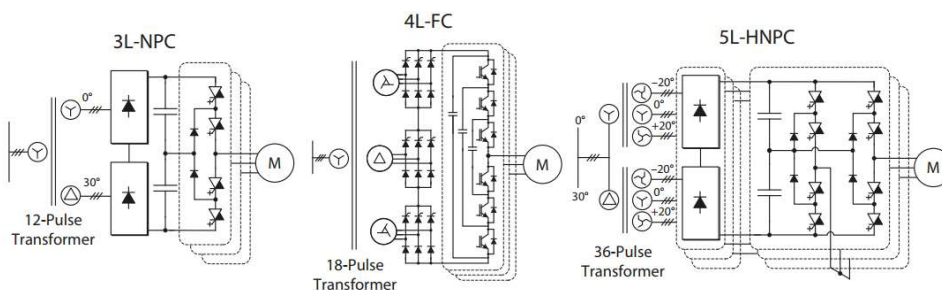
Los semiconductores que más se usan para variadores de media tensión son los tiristores de conmutación de puerta integrada (IGCT) que son una evolución de los GTO y los transistores de puerta mejorada por inyección (IEGT) que se pueden considerar un IGBT para tensiones altas por lo que también se conocen como MV-IGBT o HV-IGBT (Danfoss, 2019, p. 81).



Cuando se trabaja con aplicaciones regenerativas por lo general se debe acudir a variadores con semiconductores de media tensión. En la Figura 31 se observan las principales topologías de variadores con semiconductores de media tensión. Estas topologías pueden diseñarse con más niveles de tensión y así bajar la distorsión armónica de salida aproximándose más a una señal sinusoidal. Los rectificadores aparecen con transformadores multiusos y diodos, pero estas topologías de inversor son compatibles también con rectificadores AFE.

**Figura 31**

*Principales topologías de variadores con semiconductores MT*



*Fuente.* Danfoss. Facts Worth Knowing about AC Drives. p. 82. [Archivo PDF]. Nordborg: PE-MSMBM/ColorSigns. [https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPM403A402\\_FWK.pdf](https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPM403A402_FWK.pdf)

El convertidor anclado por diodo con punto neutro en este caso de tres niveles (3L-NPC) utiliza cuatro interruptores de potencia por fase, sujetos con diodos a un punto medio del enlace del bus DC. Cada interruptor bloquea la mitad de la tensión total del bus DC. El convertidor sujeta la salida de fase al punto neutro, generando un nivel de tensión adicional. Como la salida es de tres niveles tiene bajos niveles de  $dv/dt$  y THD en la salida.

El convertidor por condensadores flotantes en este caso de cuatro niveles (4L-FLC) tiene tres pares de interruptores complementarios en cada uno de los inversores. Cada par de interruptores con un condensador volante forma una celda de potencia. Se pueden conectar celdas adicionales, lo que aumenta el número de niveles de tensión del

convertidor que es de cuatro para una sola celda. El control de esta topología presenta gran complejidad.

El inversor de puente H (5L-HNPC) se desarrolla a partir de las topologías de diodo anclado y de las celdas de baja tensión, pero a diferencia de esta se usa una sola celda por fase. Esto genera una forma de onda de salida de tensión de cinco niveles. Al igual que el convertidor de diodo anclado, esta topología requiere buses DC separados (Danfoss, 2019, p. 82).

### **Medición de Variables en Variadores de Frecuencia**

Los variadores de frecuencia manejan cuatro variables fundamentales en su proceso de control. La tensión y la corriente son variables eléctricas que mide directamente mientras que las variables mecánicas son velocidad y torque y se calculan en base a las variables eléctricas y a los datos del motor que se ingresaron al programarlo y los que se midieron si se realizó previamente el proceso de autodetección del motor.

La velocidad e incluso la posición también pueden ser medidas directamente con un encoder o un resolver mientras que el torque es una variable mucho más difícil de medir. Tanto así que los instrumentos de medición de torque en ejes de motor se utilizan en bancos de pruebas de laboratorios y los variadores de frecuencia no cuentan con entradas dedicadas a dispositivos de medición de torque como si las tienen para dispositivos de medición de velocidad y posición.

### ***Mediciones Eléctricas en Variadores de Frecuencia***

Los variadores de frecuencia internamente miden la tensión de salida, la tensión del bus DC, la corriente de salida y la corriente del bus DC. Esta última variable por lo general no se puede visualizar en el display de los variadores, sino que se necesita en el sistema de control del motor. En estrategias de control simples puede pasar lo contrario. Se puede observar una variable

en el display, pero esta no interviene en el control del variador. La tensión y corriente de entrada rara vez son medidas o visualizables en el variador de frecuencia y no intervienen en el sistema de control.

### **Tensión de Entrada.**

La tensión de entrada del variador se debe medir para saber si está dentro de su rango de funcionamiento. Esta medición se puede realizar con un instrumento de medición convencional. Una tensión muy baja produce más demanda de corriente en el rectificador y una tensión muy alta puede provocar la explosión de los condensadores del bus DC. Los variadores se alarman por estas fallas en el suministro cuando están en valores fuera del rango con una tolerancia generalmente del 10 %. Por ejemplo, si un variador es de 380-500 VAC se alarmará por baja tensión en 342 VAC y a 550 VAC se alarmará por sobretensión en el bus DC. Ante estas alarmas el variador se detendrá de inmediato, pero en el caso de la sobretensión no provocada por regeneración el variador está desprotegido por lo que si la instalación eléctrica ofrece este tipo de riesgo se debe utilizar un contactor aguas arriba del variador activado por un monitor de tensión.

**Corriente de Entrada.** La corriente de entrada del variador debe ser medida con un dispositivo true RMS ya que esta no tiene forma senoidal. Su distorsión armónica es más acentuada cuando el variador trabaja con poca carga. Un desbalance en la corriente de entrada del variador puede indicar una falla en el rectificador de este.

**Tensión de Bus DC.** La tensión del bus DC se puede medir con un instrumento convencional que tenga un rango de medida apropiado. Aunque es un valor DC muchas veces es

de bastante utilidad medir en escala AC para conocer el valor del rizado principalmente con el variador en marcha ya que también es un buen indicador del estado del rectificador.

Por regla general un bus DC debe tener una tensión de raíz de dos por la tensión de línea de entrada con el variador detenido o en vacío. Esto se cumple por lo general con rectificadores trifásicos y monofásicos. Cuando la tensión no corresponde con el valor esperado generalmente se debe a la distorsión armónica de la tensión de entrada si esto sucede es aconsejable realizar mediciones con un analizador de redes para determinar la calidad del suministro eléctrico. Cuando la diferencia con el valor esperado no es debida al suministro entonces debe localizarse la falla dentro del variador de frecuencia.

Cuando el variador está en marcha la tensión rms del bus DC debe ser la tensión de línea por 1.35. El rizado no debe ser mayor al 15.5 % de la tensión de bus DC a plena carga para un rectificador trifásico de seis pulsos. Por ejemplo, un variador alimentado con tensión de línea de 480 VAC con una señal perfectamente senoidal debe tener una tensión de bus DC en vacío de 679 VDC. En marcha a plena carga la tensión rms del bus DC debe ser de 648 VDC y el valor más bajo que se debe medir es de 588 VDC por lo que la tensión de rizado no puede ser superior a 91 VAC.

**Corriente de Bus DC.** La corriente de bus DC no es una variable que se mida habitualmente, aunque si puede ser de utilidad medirla en algunos casos para detectar fallas. En variadores pequeños suele ser imposible medirla ya que esta circula por pistas de cobre y no por cables.

**Tensión de Salida.** La tensión de salida al ser PWM requiere un filtrado para poder realizar una medición correcta. Los variadores de frecuencia cuentan con circuitos para realizar esta tarea, pero en el caso de instrumentos para medición externos esta es la variable más

compleja de medir ya que la mayoría de las pinzas amperimétricas y multímetros del mercado aun siendo true RMS no pueden realizar esta medición de forma efectiva ya que para ello el instrumento debe contar con un filtro pasa bajos que rechace la frecuencia portadora.

**Corriente de Salida.** El variador mide su corriente de salida con sensores de efecto Hall ubicados en dos o tres fases. Otros tipos de sensores podrían ser efectivos para realizar la medición de corriente de salida ya que esta tiende a ser senoidal, pero para la medición de corrientes a frecuencias muy bajas no podrían realizar mediciones correctas por lo que no habría una lectura apenas se inicie la rampa de arranque y no sería posible detectar un rotor bloqueado. En el caso de los instrumentos externos de medición la lectura de corriente de salida con instrumentos convencionales no es tan imprecisa o imposible como en el caso de la medición de tensión de salida, pero la precisión es mayor con el uso de una pinza amperimétrica con filtro pasa bajos.

**Frecuencia.** Al igual que en el caso de la tensión el filtro pasa-bajo es de vital importancia en el instrumento de medición externo para poder realizar correctamente la medición de la frecuencia de salida del variador. De lo contrario medirá la frecuencia portadora o dará lecturas erróneas de frecuencia.

**Potencia de Salida.** El variador calcula la potencia de salida en base a la corriente, la tensión y desface entre estos. Variadores de gamas altas pueden calcular la potencia en el eje del motor ya que cuentan con algoritmos que determinan la eficiencia del motor en base a los datos programados y a los de la autodetección. La medición de potencia con instrumentos externos podría realizarse con osciloscopios o con equipos especializados como el analizador de motores Fluke MDA 550 que se observa en la Figura 32. Este instrumento está diseñado para realizar las

mediciones más importantes en un variador de frecuencia incluidas las corrientes de modo común en el eje del motor o el  $dv/dt$ .

**Figura 32**

*Analizador de motores Fluke MDA-550*



*Fuente.* FLUKE. Analizadores de motor de la serie MDA-550 y MDA-510 de Fluke. [En línea] Fluke Corporation, 2020. [Citado el: 02 de 04 de 2020.] <https://www.fluke.com/es-co/producto/comprobacion-electrica/osciloscopios-portatiles/mda-500-series>.

**Medidas en Semiconductores.** Para la realización de mantenimiento en los variadores de frecuencia se realiza un test estático de sus semiconductores de potencia con respecto al bus DC. Este test consiste en realizar una medición en modo tensión de diodo con el variador desenergizado y los condensadores descargados entre las fases de entrada con respecto a las barras DC. Los diodos e IGBTs deben dar una medida de tensión con la punta del multímetro o pinza amperimétrica en la barra DC de signo contrario y deben marcar circuito abierto cuando el signo de la punta es igual al de la barra DC. Esta medición varía según el modelo del instrumento. Los SCRs de los rectificadores controlados y semi controlados no deben medir ninguna tensión ya que necesitan una señal de activación. También se pueden hacer mediciones de resistencia entre las terminales de control y las terminales de potencia de los módulos semiconductores. La

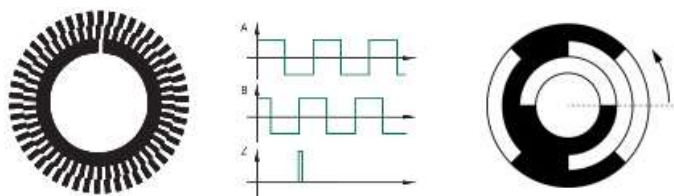
medición de la capacitancia del banco de condensadores también es una prueba que se realiza en ocasiones.

### ***Medición de velocidad y posición***

La medición de la velocidad angular y la posición no siempre se realiza en el eje del motor. En muchas ocasiones se realiza en el eje de salida de un reductor. El variador de velocidad puede llegar a hacer un cálculo bastante aproximado de la velocidad del eje del motor y este cálculo depende de la estrategia de control utilizada alcanzando su máxima aproximación con el control directo de torque. El deslizamiento de los motores de inducción depende de muchas variables y esto dificulta la medición exacta de la velocidad del eje del motor por lo que esta es una gran desventaja de los motores de inducción con respecto a los motores síncronos como los de imán permanente ya que estos permiten trabajar en aplicaciones más exigentes en cuanto a precisión sin tener que recurrir la mayoría de las veces a un dispositivo de medición de velocidad y posición.

**Figura 33**

*Encoders incremental y absoluto*



*Nota.* izquierda incremental, derecha absoluto.

*Fuente:* Science Direct. Science Direct. [En línea] 2020. [Citado el: 03 de 04 de 2020.]

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/incremental-encoder>

Los dispositivos que se encargan de las mediciones de velocidad y posición a nivel industrial más conocidos son los encoders incrementales, los encoders absolutos y los resolvers. La diferencia fundamental entre un encoder y un resolver es que los primeros tienen salidas

digitales mientras que los segundos tienen salidas analógicas. Los encoders pueden clasificarse por su forma de generar la señal eléctrica en magnéticos, ópticos, capacitivos e inductivos.

**Encoder Incremental.** Los encoders incrementales (Figura 33 izquierda) cuentan con una circunferencia con tres niveles. Cada nivel es un canal y la resolución del encoder depende del número de divisiones que tiene cada nivel. El primer nivel es el canal A y si solo se lee este canal solo se tendrá la velocidad del eje. El segundo canal es el B que tiene la misma cantidad de divisiones que el canal A, pero con un desfase de  $90^\circ$  por lo que leyendo este canal junto con el A se puede también determinar la dirección del eje ya que conociendo que canal está en adelante es fácil determinarla. Por último, está el canal Z que tiene una sola división por vuelta y sirve como origen para determinar el ángulo del eje por lo que cuando el encoder se encuentra sobre Z se considera que el eje está a  $0^\circ$ .

Cuando se presente un corte de energía la información del ángulo se pierde a menos que en el momento de corte el encoder estuviera en  $0^\circ$  por lo que sería necesario que el eje girara hasta encontrar su punto de origen. La aplicación debe permitir esto para poder usar un encoder incremental (SICK, 2020).

**Encoder Absoluto.** Los encoders absolutos (Figura 33 derecha) cuentan con  $n$  niveles y su resolución es  $2^n$ . Cada posición equivale a un número binario en código Gray de tal modo en cada nivel se lee un dígito de este número. Cada nivel tiene la mitad de su superficie en modo conducción (1) y la otra mitad en modo de no conducción (0) la cantidad de unos y ceros de cada nivel aumenta entre más exterior sea este. El código Gray sirve para detectar errores de transmisión ya que de una posición a la otra solo debe cambiar un bit. Por ejemplo, un encoder de



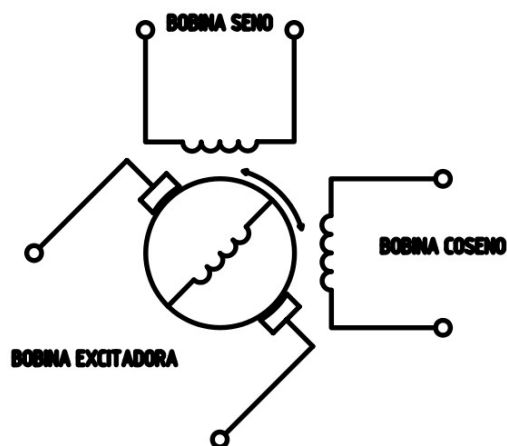
4 cuatro bits tendría como origen la posición 0000, la anterior sería la 1000 y la siguiente la 0001.

“El encoder absoluto a diferencia del incremental brinda información de posición después de presentarse un corte de energía ya que cada posición está codificada y no hay necesidad de realizar un conteo con respecto a la posición de origen” (SICK, 2020).

**Resolvers.** Los resolvers son dispositivos transformadores rotativos que cuentan con una bobina excitadora solidaria al eje del motor que se alimenta con corriente alterna por medio de escobillas e induce corriente en dos bobinas que se encuentran a  $90^\circ$  una de la otra por lo que son denominadas bobina seno y bobina coseno. La forma de las ondas de corriente inducida permite calcular la velocidad, el sentido de giro y la posición del eje. El resolver debe estar instalado lejos de fuentes de interferencia electromagnética y se debe estar pendiente del estado de sus escobillas ya que generan ruido si presentan un alto desgaste. La Figura 34 muestra el esquema eléctrico de un resolver.

**Figura 34**

*Esquema eléctrico de un resolver*



*Fuente. Autoría propia*

## **Efectos de los Variadores de Frecuencia en la Fuente de Alimentación, la Carga y el Entorno**

Los variadores de frecuencia presentan múltiples posibilidades de mejora en los procesos donde son implementados, pero desafortunadamente al ser dispositivos de electrónica de potencia tienen efectos tanto en la fuente de alimentación como en la carga y el entorno que los rodea. Este capítulo trata de describir estos efectos y como mitigarlos.

Los principales efectos del uso de variadores de frecuencia son la distorsión armónica de corriente y de tensión, la interferencia electromagnética, Daños en el aislamiento del motor y/o en los conductores de salida, daños en los rodamientos del motor y ruido acústico. Vale la pena aclarar que todos estos efectos son solucionables, dependen en gran medida de la calidad de la instalación y del equipo y en muchos casos no se presentan o no causan afectación al proceso (a excepción de los que afectan a los motores).

### **Interferencia Electromagnética**

La interferencia electromagnética conocida por la abreviación EMI (Electro Magnetic Interference) o como RFI (Radio Frequency Interference) es el efecto nocivo sufrido por un equipo al tener contacto con ondas electromagnéticas. Estas ondas pueden tener múltiples orígenes como por ejemplo una tormenta solar o un dispositivo de electrónica de potencia.

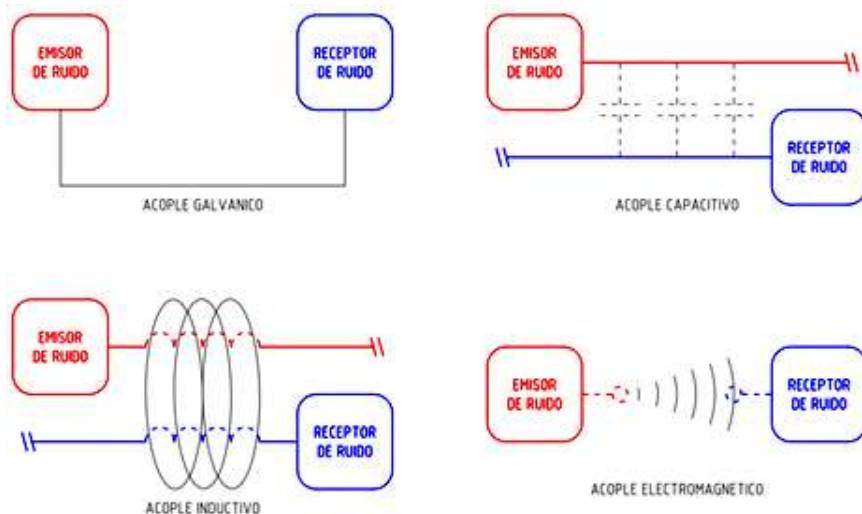
La interferencia electromagnética puede propagarse a través de un conductor cuando se presenta un acople galvánico. En este caso se puede hablar de ruido conducido. También existe el ruido irradiado que puede presentarse por presencia de acoples inductivos, capacitivos o electromagnéticos. En la Figura 35 se pueden observar los distintos tipos de acoples de ruido de radiofrecuencia.

La interferencia electromagnética producida por los variadores de frecuencia puede afectar tanto elementos conectados a la misma red de alimentación como a elementos cercanos a los cables de salida y en ciertos casos incluso al motor.

La resolución de problemas de EMI consiste en identificar la fuente de ruido, el modo de acoplamiento y la reducción de este a un nivel aceptable. Cuando un equipo funciona sin introducir o recibir perturbaciones intolerables se puede decir que hay una compatibilidad electromagnética (EMC). El equipo debe tener un nivel determinado de inmunidad a la interferencia electromagnética y así mismo debe generar un nivel tolerable de emisión electromagnética (Danfoss, 2019, p. 133).

**Figura 35**

*Tipos de acoples de interferencia electromagnética*



*Fuente.* Autoría propia

El segmento delimitado por estos dos niveles se denomina brecha electromagnética. La interferencia electromagnética puede presentarse en modo diferencial (DM) o en modo común (CM). En modo diferencial viaja en ambas líneas del bucle de corriente en direcciones opuestas, en serie con la señal deseada. En modo común viaja en ambas

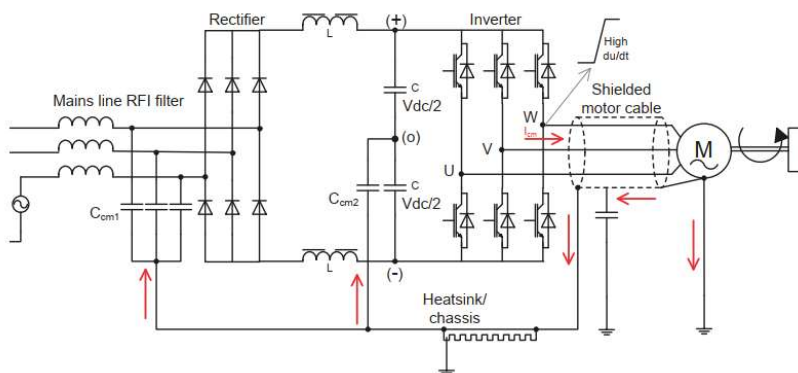
líneas en la misma dirección y su ruta de retorno es a través de un terreno de referencia común (Danfoss, 2019, p. 134).

Los filtros EMI externos e internos de los variadores de frecuencia se encuentran instalados en la alimentación de estos. Sin embargo, la real fuente de interferencia electromagnética es el circuito inversor ya que la conmutación de los IGBTs tiene un nivel de  $dv/dt$  bastante elevado lo que produce circulación de corrientes de modo común como lo muestra la Figura 36.

El chasis del variador conduce las corrientes de modo común por lo que el filtro EMI se encuentra aterrizado mitigando la conducción de estas corrientes aguas arriba del variador. Las puestas a tierra del variador, así como las capacitancias parasitas del cableado del motor producen las corrientes de modo común en el motor.

**Figura 36**

*Emisión EMI en un variador de frecuencia*



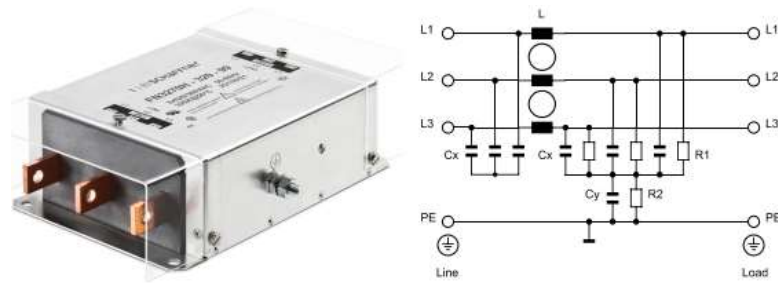
*Fuente.* Danfoss. Facts Worth Knowing about AC Drives. p. 135. [Archivo PDF]. Nordborg: PE-MSMBM/ColorSigns. [https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPM403A402\\_FWK.pdf](https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPM403A402_FWK.pdf)

Los filtros EMI en los variadores de frecuencia pueden ser internos o externos y se pueden seleccionar de distintas categorías según el entorno en el que se van a encontrar. Estos filtros mitigan principalmente la EMI conducida. La EMI radiada se mitiga principalmente con

una correcta instalación de los equipos. En la Figura 37 se observa un filtro EMI junto con su esquema eléctrico.

**Figura 37**

*Filtro EMI externo Schaffner con su esquema eléctrico*



*Fuente.* Schaffner. (2019). DATASHEET 3-Phase Filters FN 3270 Compact EMC/RFI Filter for Industrial Motor Drive Applications [Archivo PDF]. p. 1. Schaffner Group.

[https://www.schaffner.com/fileadmin/user\\_upload/pim/products/datasheets/FN3270\\_FN3271.pdf](https://www.schaffner.com/fileadmin/user_upload/pim/products/datasheets/FN3270_FN3271.pdf)

Las normas que regulan la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos-electrónicos utilizan el término PDS (Power Drive System) para referirse al conjunto de motor y drive (incluido el cableado entre estos). Este conjunto no incluye la carga del motor, la transmisión del motor a la carga ni el cableado de alimentación del drive.

Las normas de compatibilidad electromagnética más destacadas son la EN55011 (equivalente a la CISPR11) que trata sobre equipos industriales, científicos y médicos, sus características de las perturbaciones radioeléctricas, límites y métodos de medición. La norma IEC61000 que trata sobre CEM. En sus partes 6-1 y 6-3 trata sobre normas genéricas en entornos residenciales, comerciales y de industria ligera. La 6-1 habla sobre inmunidad mientras que la 6-3 habla sobre emisión. La norma IEC 61800 habla sobre accionamientos eléctricos de potencia de velocidad variable. Su parte 3 trata sobre los requisitos CEM y métodos de ensayo específicos.

Según la norma EN55011 los entornos pueden clasificarse en clase B que incluye locales domésticos, establecimientos directamente conectados sin transformadores intermedios a una red de suministro de energía de baja tensión que abastece edificios utilizados para fines domésticos. La clase A incluye todos los establecimientos que no sean los conectados directamente a una red de suministro de energía de baja tensión que abastece a los edificios utilizados para fines domésticos. Es decir, entornos industriales donde existe un transformador entre la red y el entorno.

Los PDSs según la norma IEC 61800-3 se definen en:

PDS categoría C1 de tensión nominal inferior a 1000 V, destinado al uso en entorno clase B.

PDS categoría C2 de tensión nominal inferior a 1000 V, que no es un dispositivo enchufable ni un dispositivo móvil y, cuando se utiliza en un entorno clase B, está destinado a ser instalado y puesto en servicio solo por personal calificado.

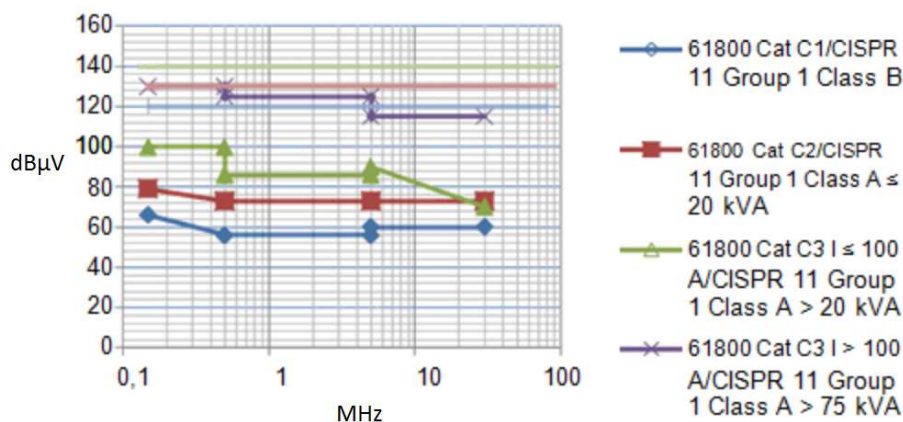
PDS categoría C3 de tensión nominal inferior a 1000 V, destinados a utilizarse en entornos clase A y no destinados a utilizarse en entornos clase B.

PDS categoría C4 de tensión nominal igual o superior a 1000 V, o corriente nominal igual o superior a 400 A, o para uso en sistemas complejos en entornos clase B (EATON, 2017, p. 5).

En la Figura38 se observan los distintos tipos de niveles de emisión de los PDS uno, dos y tres, así como las clases de entornos en los que son aptos para funcionar.

**Figura 38**

*Niveles permitidos de emisión y niveles requeridos de inmunidad*



*Fuente.* EATON. (2017). EMC and Variable Speed Drives. p. 7. [Archivo PDF]. Cleveland: EATON.

<https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/ap040179en.pdf>

En el capítulo Efectos De Los Variadores De Frecuencia En La Fuente De Alimentación, La Carga Y El Entorno está la sección de Tensiones Y Corrientes Parasitas De Alta Frecuencia en donde se trata el tema de las corrientes de modo común en el motor y en la sección Ondas Reflejadas se trata el  $dv/dt$  de la señal de tensión. La forma correcta de efectuar la instalación del variador de frecuencia con una correcta compatibilidad electromagnética se encuentra en el capítulo de Consideraciones Para El Diseño De Sistemas De Variación De Velocidad. Este punto es muy importante ya que las señales de control (principalmente las analógicas) son susceptibles a fallar por EMI y una instalación correcta es la única forma de mitigar estas perturbaciones.

### **Distorsión Armónica**

Las cargas no lineales como los variadores de frecuencia se caracterizan por generar corrientes no senoidales lo que produce que tengan componentes armónicas y por lo tanto una distorsión armónica de corriente (THiD) que a su vez genera una distorsión armónica de tensión (THvD) siendo generalmente la primera mayor que la segunda. Los variadores de frecuencia al

conectarse a la red por medio de un rectificador generan una distorsión armónica de corriente que depende de su topología y su porcentaje de carga principalmente.

Todas las señales periódicas no senoidales son iguales a una señal senoidal fundamental sumada con señales senoidales de frecuencias múltiplos de esta. Cada una con un determinado valor de fase. El número de veces que la frecuencia fundamental está en la frecuencia de un armónico es igual al orden de este. Por ejemplo, un armónico de orden siete, presente en una señal de frecuencia fundamental de 60 Hz tendrá una frecuencia de 420 Hz.

La señal fundamental y los armónicos están definidos por dos parámetros que son la amplitud y la fase. En los circuitos eléctricos lo más común es que las señales de tensión y corriente con distorsión armónica presenten la mayor amplitud en la señal fundamental y entre mayor sea el armónico menor sea su amplitud. El valor de la amplitud y la fase de la fundamental y los armónicos se obtiene por medio de los coeficientes de Fourier donde cada coeficiente corresponde con un armónico. Cuando se obtienen los coeficientes de una señal, esta se está pasando del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

La suma de Fourier de una señal en el dominio del tiempo se encuentra definida en la ecuación (14)

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sen(n\omega t)) \quad (14)$$

Donde  $n$  es el número del armónico,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$  son coeficientes que se obtienen mediante las ecuaciones (15), (16) y (17).

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (15)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (16)$$



$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (17)$$

Donde  $T$  es el periodo de la función. El coeficiente  $a_0$  tiene el valor DC de la señal por lo que generalmente es igual a cero. Los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  dan una representación cartesiana de la función. Para tener una representación polar de magnitud y ángulo se debe realizar la conversión de las ecuaciones (15), (16) y (17) para poder representar la función en la forma de la ecuación (18).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} |C_n| \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (18)$$

Donde:

$$|C_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (19)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right) \quad (20)$$

Las condiciones que debe cumplir una señal para poderse representar en series de Fourier son que debe ser continua en su periodo o tener un numero finito de discontinuidades, debe tener un numero finito de máximos y mínimos y por último la integral definida de cero hasta su periodo de su valor absoluto debe ser finita (Bueno, 2019, p. 4).

Si el número de armónicos no es infinito es posible hacer el proceso inverso sumando todos los armónicos consiguiendo así de nuevo la misma señal en el dominio del tiempo. Si el número de armónicos es infinito la señal solo podrá ser aproximada y será más parecida a la original mientras mayor sea el número de coeficientes de Fourier sumados.

La distorsión armónica (*THD*) se define en la ecuación (21).

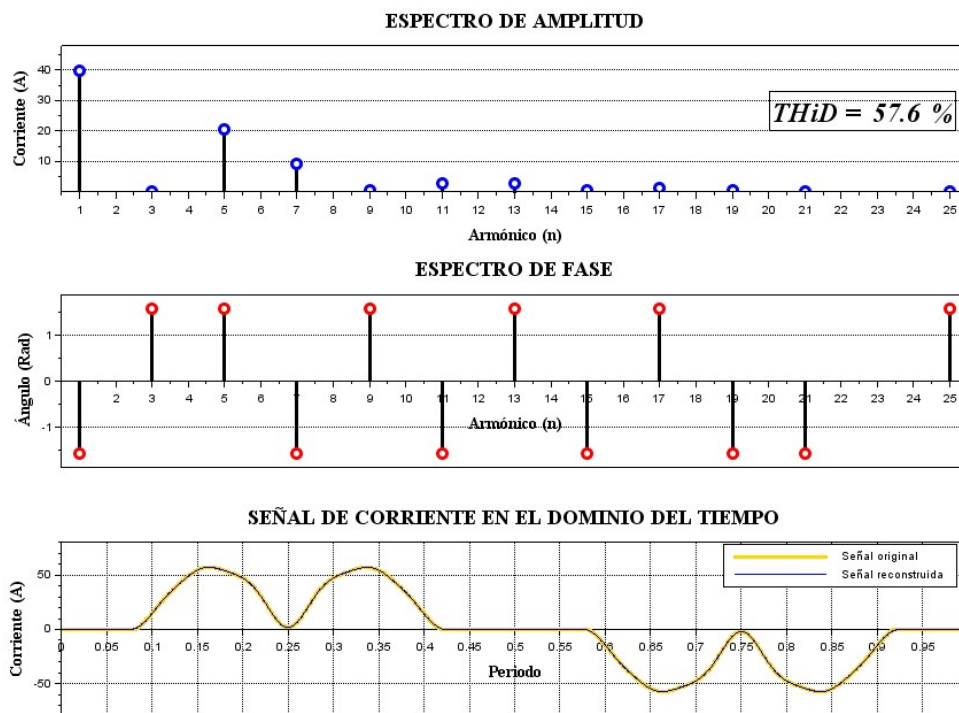
$$THD = \frac{\sqrt{C_2^2 + C_3^2 + C_4^2 + \dots + C_n^2}}{C_1} \times 100 \quad (21)$$

Donde  $C_1$  es el armónico fundamental y  $C_n$  son los armónicos desde el segundo en adelante.

En la Figura 39 se observa en la parte inferior de color amarillo una señal de corriente no lineal similar a la del rectificador de los variadores de frecuencia.

**Figura 39**

*Señal de corriente no lineal con sus espectros*



*Fuente. Autoría propia*

En la parte superior el espectro de magnitud compuesto por los valores de  $|C_n|$  y en la mitad el espectro de fase compuesto por los valores de  $\theta_n$ . La distorsión armónica es del 57.6%. El cálculo se ha realizado con 25 armónicos lográndose reconstruir una señal prácticamente igual a la original. En la parte inferior se puede observar la señal reconstruida en color azul con línea delgada y como esta se encuentra dentro de la línea amarilla que es más gruesa y que corresponde a la señal original. En el espectro de magnitud se puede observar la ausencia de los armónicos pares y el valor despreciable de los armónicos múltiplos de tres o de secuencia cero.

Los armónicos presentes en la onda de corriente de un variador de frecuencia suelen ser impares no múltiplos de tres. Es decir, impares de secuencia positiva y negativa. Los armónicos pares se presentan cuando no hay simetría entre los semiciclos de una señal, algo que no debe presentarse en un rectificador trifásico que esté en buenas condiciones. Los armónicos múltiplos de tres o de secuencia cero se presentan en cargas no lineales monofásicas mientras que para el caso de las cargas trifásicas se presentan solo si hay un desbalance de corriente por lo que su presencia notoria en un variador de frecuencia también podría ser causada por desbalance de tensión de alimentación o daño en su rectificador.

La distorsión armónica de tensión (THvD) por su parte se produce por la interacción de las corrientes con distorsión armónica con los componentes de la red como por ejemplo los transformadores, los condensadores, las líneas de transmisión etcétera. Básicamente los componentes de la red presentan una impedancia distinta para cada armónico lo que produce una deformación en la forma de la señal de tensión. Por ejemplo, debido al efecto piel los conductores gruesos presentan mayores resistencias e inductancias internas a medida que aumenta la frecuencia de los armónicos.

El modelamiento de la distorsión armónica de tensión presenta una alta complejidad y depende mucho de los parámetros de los componentes del sistema. Algunos parámetros pueden ser despreciables en ciertos casos y bastante relevantes en otros. Por ejemplo, el cálculo de la distorsión armónica de tensión en circuitos de líneas de transmisión aéreas de media tensión es muy distinto al de circuitos de baja tensión con cables canalizados por tubería metálica.

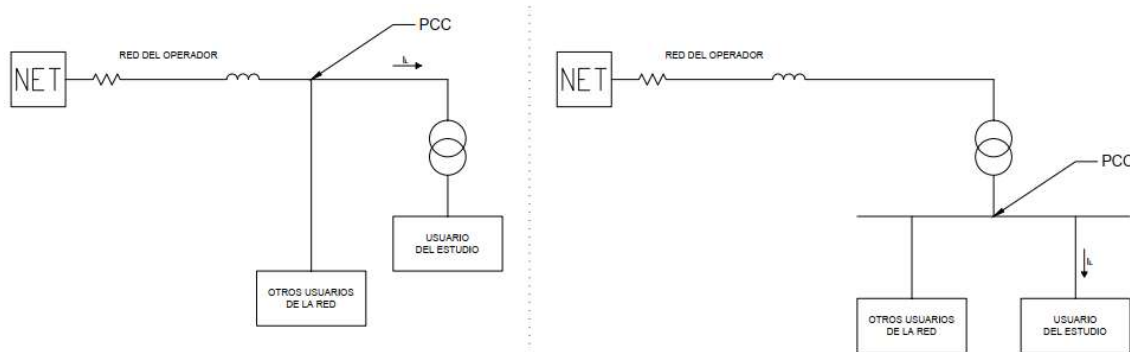
A menos que se desee analizar un equipo o un panel eléctrico en particular, las mediciones de distorsión armónica se realizan en el PCC (Point of Common Couplin) que

es el punto de conexión común entre una instalación de un usuario con la red pública del sistema eléctrico (Franco J. et al, 2018, p. 10).

En la Figura 40 se observa a la izquierda el punto de acople común para un usuario industrial. A la derecha se observa el punto de acople común para un usuario comercial.

**Figura 40**

*Punto de acople común*



*Fuente.* Autoría propia

Según la IEEE los principales problemas que genera la distorsión armónica son fallas en aislamiento de bancos de condensadores y conductores, interferencias en comunicaciones (particularmente en los de onda portadora), pérdidas elevadas por calentamiento en máquinas síncronas, mayores pérdidas en el núcleo y en los devanados de los transformadores, resonancias que producen sobretensiones y sobre corrientes, errores de medición, mala operación de sistemas de control de estado sólido, problemas de funcionamiento en dispositivos de protección, interferencia con sistemas de control y protección de motores, oscilaciones mecánicas en máquinas síncronas y motores de inducción, operación inestable en circuitos de disparo basados en la detección de cruce por cero (Parra López, 2004, p. 58-59).

Se debe tener en cuenta que no necesariamente un equipo que genere una alta distorsión armónica de corriente causará perturbaciones en la red ya que esto también depende de la

potencia de este con respecto a la potencia que puede suministrar la red. Por ejemplo, los cargadores de celular tienen una distorsión armónica de corriente bastante alta pero la potencia que consumen los hace inofensivos para la red. Los variadores de frecuencia por su parte tienen una mayor distorsión armónica de corriente al estar trabajando a baja carga, pero de la misma forma también se reduce la potencia que consumen siendo más relevante la distorsión armónica a plena carga.

Para tener claro el nivel de afectación por distorsión armónica existente en una red se usa el factor de distorsión armónica de demanda (TDD) que tiene en cuenta la distorsión armónica de corriente con respecto a la corriente máxima que puede suministrar la red. Su definición está en la ecuación (22).

$$TDD = \frac{i_1}{i_{max}} \times THiD = \frac{\sqrt{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + \dots + i_n^2}}{i_{max}} \times 100 \quad (22)$$

Donde  $i_{max}$  es la corriente de carga máxima.

La norma IEEE 519 2014 establece los límites aceptables de distorsión armónica en redes eléctricas. En el anexo Q se encuentran los valores estipulados por esta norma.

La presencia de distorsión armónica de corriente en una red eléctrica hace que sea necesario cambiar el conocido triángulo de potencias por una pirámide ya que además de la potencia activa y de la potencia reactiva aparece otra componente en la potencia aparente llamada potencia distorsionante o potencia de distorsión que es la potencia asociada a la circulación de armónicos en la red y que al igual que la potencia reactiva incrementa la exigencia de conductores, interruptores y transformadores. Su símbolo es la letra D y se expresa en la ecuación (23).

$$D = v \sqrt{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 + \dots + i_n^2} = v \left( \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2} \right) \quad (23)$$

Esta ecuación aplica para una señal  $v$  senoidal o con distorsión armónica despreciable.

La potencia aparente con distorsión armónica se define en la ecuación (24). En la Figura 41 se muestran las componentes de la potencia aparente.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (24)$$

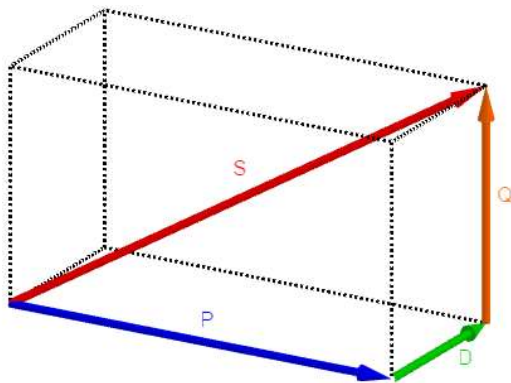
Donde  $P$  y  $Q$  solo tienen relación con la señal fundamental por lo que también se podrían mencionar como  $P_1$  y  $Q_1$ .  $D$  por su parte se relaciona con las señales distintas de la fundamental.

Al cambiar la definición de potencia aparente, la aparición de la potencia distorsionante hace que el  $\cos(\varphi)$  no sea igual que el factor de potencia ya que el primero solo tiene en cuenta el desfase entre las señales de tensión y corriente. El factor de potencia involucrando potencia distorsionante se define en la ecuación (25).

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (25)$$

**Figura 41**

*Vectores de potencia*



*Fuente.* Autoría propia

La mitigación de la distorsión armónica de corriente mitiga también la distorsión armónica de tensión por lo que se usan las mismas soluciones para mitigarlas. Estas están descritas en el anexo Q y pueden clasificarse en reactancias de línea, reactancias de bus DC, rectificadores de 12, 18 y más pulsos, filtros de armónicos pasivos, filtros de armónicos activos

y rectificadores AFE. En algunos casos las soluciones de mitigación de armónicos vienen integradas a los variadores de frecuencia mientras que en otros deben ser agregadas.

### **Ondas Reflejadas**

Un circuito de corriente alterna con una fuente de energía y una carga puede presentar ondas de tensión y corriente en sentido inverso. Esto es debido al fenómeno de reflexión que aparece en otros tipos de ondas como el sonido, la luz o las ondas superficiales en el agua. Este fenómeno se presenta al aparecer un cambio en el medio de propagación de las ondas. Este cambio implica que las ondas se reflejen parcial o totalmente (Chipman, 1971, P. 31).

Para el caso de los variadores de frecuencia la fuente de energía es el variador mismo, el medio de propagación es la línea de transmisión y el cambio de medio es la diferencia entre la impedancia de la línea y la impedancia de las terminales del motor.

El fenómeno de onda reflejada entre el variador y el motor es mucho más notorio que en sistemas de transmisión con señales senoidales y produce sobretensiones transitorias que pueden llegar a duplicar en valor a la tensión en el bus DC del variador de frecuencia. Estas sobretensiones pueden afectar principalmente el aislamiento del motor y en menor medida a los conductores (Acero, 2012, p. 6).

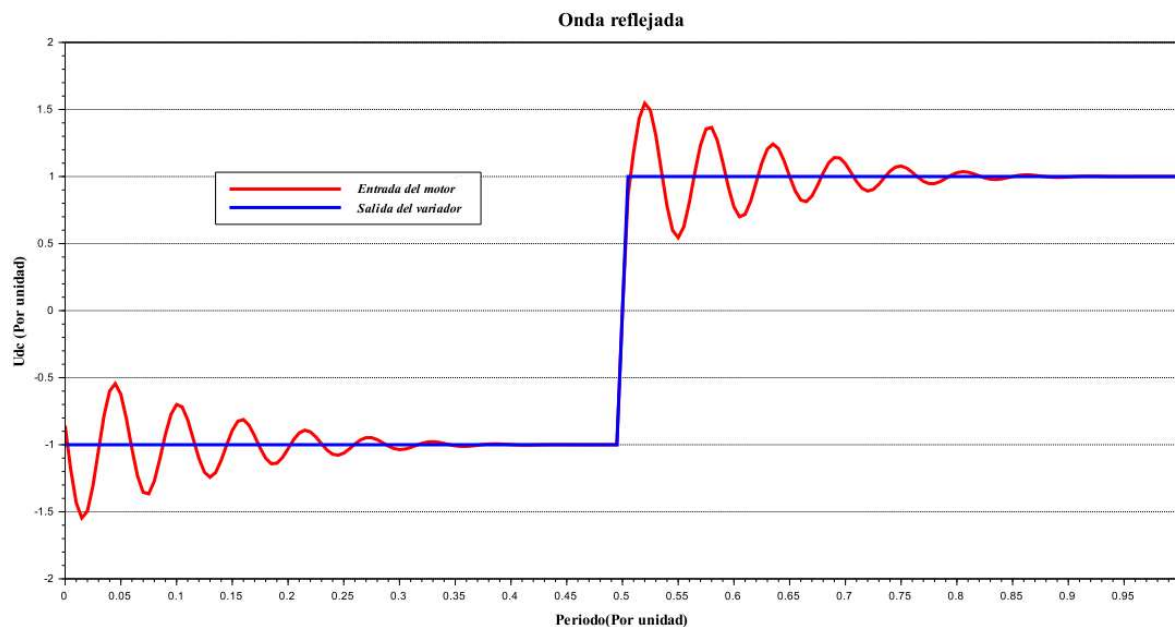
Los factores que influyen en la aparición de onda reflejada en sistemas con variadores de frecuencia son la longitud de los conductores, las características eléctricas de los conductores, el  $dv/dt$  de los semiconductores y las impedancias del variador y del motor (Acero, 2012, p. 3).

En la Figura 42 se observa un lapso en el que una señal de salida de un variador de frecuencia (en color azul) tiene un valor de  $-UDC$  y pasa a un valor  $+UDC$ . La misma señal (en

color rojo) llega al motor distorsionada por el efecto de onda reflejada llegando a alcanzar un valor pico 1.5 UDC.

**Figura 42**

*Pulso de salida de variador y pulso de entrada de motor con onda reflejada*



*Fuente.* Autoría propia

La mitigación del fenómeno de onda reflejada puede realizarse con la instalación de un filtro seno a la salida del variador que convertirá las señales PWM en una aproximación muy buena de señales senoidales contrarrestando así el efecto del  $dv/dt$  de los IGBTs. Si el fenómeno de onda reflejada no es tan severo se puede usar un filtro  $dv/dt$ . El fabricante de motores Marathon<sup>®</sup> maneja un sistema de aislamiento patentado llamado Maxguard<sup>®</sup> el cual ofrece una alta resistencia al fenómeno de onda reflejada.

Es muy importante tener en cuenta que los conductores de potencia apantallados que se usan principalmente en la salida de los variadores de frecuencia tienen una mayor intensidad en el fenómeno de onda reflejada por lo que presentan mayor sobretensión a menor distancia en comparación con los conductores convencionales. El uso de este tipo de conductores sirve para



mitigar el ruido de radiofrecuencia radiado, pero además de ser más costosos su uso también implica el tener que usar con más frecuencia variadores de gamas altas (que tienen un mejor  $dv/dt$ ) y filtros seno o  $dv/dt$  que bajan la eficiencia del PDS.

### **Tensiones y Corrientes Parasitas de Alta Frecuencia**

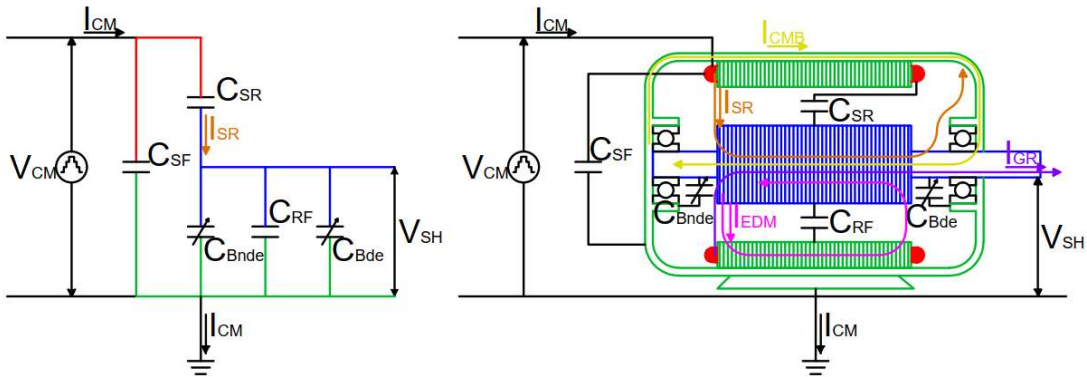
La forma no sinusoidal de la señal de salida de los variadores de frecuencia produce tensiones y corrientes parasitas que son despreciables o inexistentes en motores conectados a la red. Las tensiones parasitas interactúan con las capacitancias parasitas del motor dando origen a los distintos tipos de corrientes parasitas.

“Las corrientes parasitas se pueden clasificar en tensiones y corrientes de modo común, corrientes capacitivas, corrientes de descarga electrostática (EDM), corrientes de modo circulante y corrientes de rotor aterrizado” (López, 2015, p. 24).

En la Figura 43 se observa del lado izquierdo un diagrama eléctrico de las tensiones, corrientes y capacitancias parasitas. Del lado derecho se observa un diagrama mecánico equivalente. El circuito tiene tres nodos que son el devanado del estator en rojo, el rotor en azul y la carcasa en verde. Para este análisis se considera al estator como parte de la carcasa ya que están al mismo potencial.

**Figura 43**

*Diagramas de tensiones, corrientes y capacitancias parasitas*



*Fuente.* YASKAWA. (2005). Motor Bearing Current Phenomenon and 3-Level Inverter Technology [Archivo PDF].

p. 8. Waukegan: Yaskawa Electric America.

<https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=AN.G7.02&cmd=documents&documentName=AN.G7.02.pdf>

En la Tabla 9 se define el significado de las tensiones corrientes y capacitancias parasitas de la Figura 43.

**Tabla 9***Definiciones de tensiones, corrientes y capacitancias parásitas*

$V_{CM}$	Tensión de modo común
$I_{CM}$	Corriente de modo común
$I_{SR}$	Corriente capacitiva de los rodamientos
$I_{EDM}$	Corriente de descarga electrostática
$I_{CMB}$	Corriente de modo circulante
$I_{GR}$	Corriente de rotor aterrizado
$V_{SH}$	Tensión del eje con respecto a tierra

*Fuente.* Quintero Sarmiento, D. R., Rosero Gacia, J., & Mejía López, W. (2013). Medición de corrientes EDM sobre rodamientos en el conjunto motor de inducción y variador de frecuencia [Archivo PDF], p. 84. 9(2).

<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/2639/Medici%c3%b3n%20de%20corrientes%20EDM%20sobre%20rodamientos%20en%20el%20conjunto%20motor%20de%20inducci%c3%b3n%20y%20variador%20de%20frecuencia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

### ***Capacitancias Parasitas***

En la Figura 43 se observan los distintos tipos de capacitancias parásitas en el motor. Estas capacitancias toman relevancia ante la presencia de corrientes de modo común y se pueden clasificar en Capacitancia entre el devanado del estator y la carcasa ( $C_{SF}$ ), Capacitancia entre el rotor y el devanado del estator ( $C_{SR}$ ), Capacitancia entre la carcasa y el rotor ( $C_{RF}$ ) y capacitancias de rodamientos ( $C_B$ ).

La capacitancia entre el devanado del estator y la carcasa ( $C_{SF}$ ) es quizás la capacitancia parásita individual más grande del motor. La mayor parte de la corriente de modo común debido al alto  $dv/dt$  de la tensión de modo común fluye a través de esta capacitancia.

La capacitancia entre el rotor y el devanado del estator ( $C_{SR}$ ) tiene un valor bastante pequeño, pero a través de esta se carga el cuerpo del rotor al que está físicamente

conectado el eje del motor. Por lo tanto, el valor de esta capacitancia es muy importante para evaluar la magnitud de la tensión del eje.

La capacitancia entre la carcasa y el rotor ( $C_{RF}$ ) completa la ruta de carga que comienza desde el devanado del estator hasta la superficie del rotor. El valor de esta capacitancia es típicamente unas diez veces mayor que el de la capacitancia de la superficie del rotor ( $C_{SR}$ ) entre el devanado del estator y el rotor. Dado que la tensión a través de un capacitor es inversamente proporcional a su valor de capacitancia, la mayor parte de la tensión de modo común aplicada aparece a través de  $C_{SR}$  y solo se desarrolla una pequeña tensión a través de  $C_{RF}$  o la estructura del rotor al marco. Esta tensión se denomina "tensión del eje". Por lo tanto, la capacitancia del rotor al marco es vital para establecer el valor de la tensión del eje.

Las capacitancias de rodamientos ( $C_B$ ) o capacitancias de cojinetes se presentan cuando el motor gira en un rango de velocidad que produce que las bolas o rodillos en un rodamiento floten y exista un espacio entre estos y las pistas del rodamiento ya sean internas o externas. Este espacio se llena con una película aislante que está formada por el medio lubricante en el que flota la bola o el rodillo.

El valor de esta capacitancia depende de la velocidad del eje, el tipo de lubricante utilizado, el área superficial de la bola o el rodillo en el rodamiento, la temperatura del lubricante y la carga mecánica sobre el eje. Esta capacitancia parásita es transitoria y se forma solo cuando el motor supera cierta velocidad. El valor de esta capacitancia es importante porque sus características determinan la corriente del rodamiento y dictan la vida útil de este (YASKAWA, 2005, p. 5-9).

Como el motor tiene un rodamiento del lado de la transmisión y otro del lado del ventilador (si cuenta con ventilador), entonces la capacitancia de rodamiento se divide en  $C_{Bde}$  que es la capacitancia del rodamiento del lado de transmisión es decir del lado en el que sobresale el eje del motor y la capacitancia  $C_{Bnde}$  que es la del rodamiento del lado de no transmisión.

### ***Tensiones y Corrientes de Modo Común***

La forma de la señal de salida de un inversor trifásico al ser PWM tiene un efecto muy importante comparado con la señal de salida senoidal de un generador trifásico. En el generador la suma de las tensiones línea-tierra en cualquier instante es igual a cero mientras que en el inversor la suma de estas mismas tensiones no cumple esta condición (Bueno, 2019, p. 495).

La tensión de modo común aparece debido a que las señales PWM de la salida del inversor no se anulan al sumarse entre sí, sino que generan una señal que puede tomar los valores que se observan en la Tabla 10.

La tensión de modo común es igual al promedio de las tensiones instantáneas entre líneas y punto común del devanado del estator como se observa en la ecuación (26).

$$V_{CM} = \frac{V_U + V_V + V_W}{3} \quad (26)$$

Donde  $V_U$ ,  $V_V$  y  $V_W$  son las tensiones de cada fase de salida medidas con respecto a tierra o al punto intermedio de los condensadores del bus DC del variador (YASKAWA, 2005, p. 3).

La magnitud máxima de tensión de modo común es la mitad de la tensión del bus DC y se alcanza cuando están activados todos los interruptores del mismo nivel en el inversor. Es decir, cuando todas las salidas del inversor están en  $+U_{dc}$  o en  $-U_{dc}$  al mismo tiempo. Cuando dos interruptores están en el mismo nivel y otro en el nivel opuesto la magnitud de la tensión de modo común es igual a la sexta parte de la tensión del bus DC.

**Tabla 10***Valores de tensión de modo común*

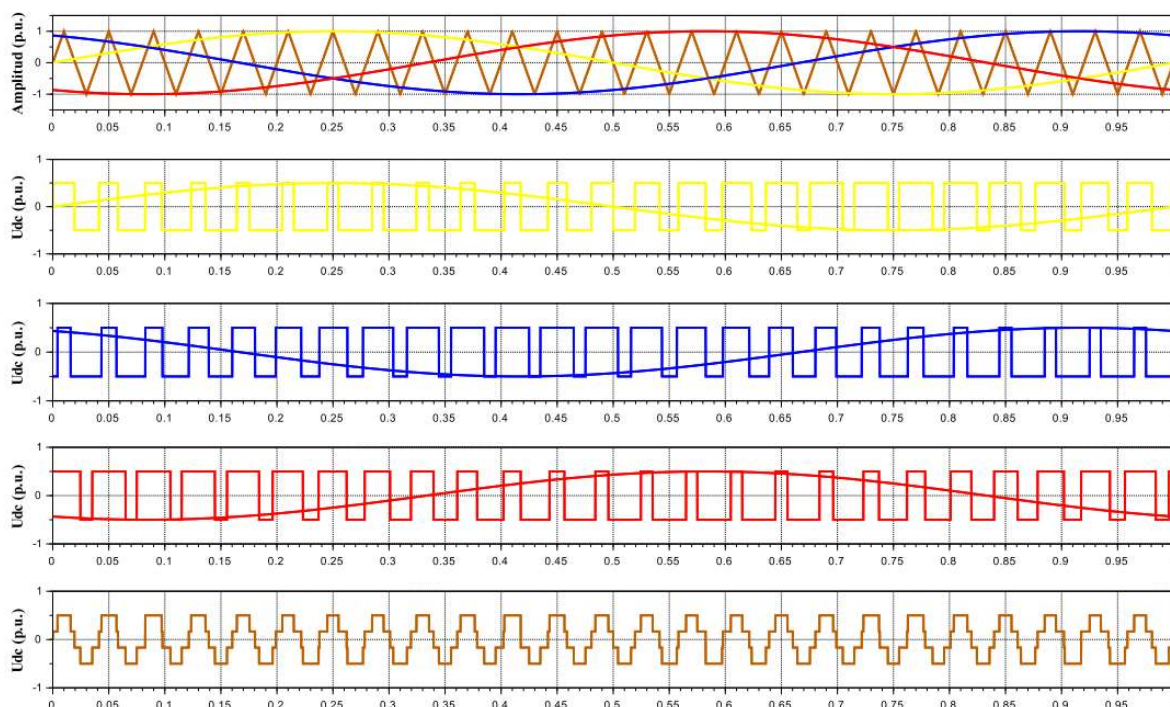
$V_{U-PE}$	$V_{V-PE}$	$V_{W-PE}$	$V_{CM}$
$\frac{V_{DC}}{2}$	$\frac{V_{DC}}{2}$	$\frac{V_{DC}}{2}$	$\frac{V_{DC}}{2}$
$\frac{V_{DC}}{2}$	$\frac{V_{DC}}{2}$	$-\frac{V_{DC}}{2}$	$\frac{V_{DC}}{6}$
$\frac{U_{DC}}{2}$	$-\frac{U_{DC}}{2}$	$-\frac{U_{DC}}{2}$	$-\frac{U_{DC}}{6}$
$-\frac{U_{DC}}{2}$	$-\frac{U_{DC}}{2}$	$-\frac{U_{DC}}{2}$	$-\frac{U_{DC}}{2}$

*Fuente.* Autoría propia

En la Figura 44 se observan las señales de un inversor SPWM. En la gráfica superior se observa la señal portadora en forma triangular y las señales de referencia de cada fase en forma senoidal. En las gráficas del medio se observa cada salida del inversor con su respectiva señal senoidal equivalente. En la gráfica inferior se observa la tensión de modo común resultante como su frecuencia es igual a la de la señal portadora.

Figura 44

Generación de la tensión de modo común



Fuente. Autoría propia

La medición directa de la tensión de modo común puede ser complicada ya que esta se encuentra entre el punto medio del bus DC y el neutro del estator (si el motor está conectado en estrella). Cuando el punto medio del bus DC es inaccesible se debe asumir que este está al mismo potencial que la tierra. Cuando el motor está conectado en delta se puede conectar una resistencia del orden de  $M\Omega$  desde cada línea del motor a una resistencia común a las tres que está conectada a tierra. La caída de tensión en la resistencia común es muy aproximada a la tensión de modo común (López, 2015, p. 35).

La corriente de modo común lógicamente es causada por la tensión de modo común y se pueden definir como la suma instantánea de las corrientes que fluyen por los conductores de salida del inversor. Al llegar al punto neutro del devanado del estator del motor, la corriente de modo común se divide en varias corrientes parasitas como se observa en la Figura 43. Si el

acople del eje es aislado, la corriente de modo común volverá por tierra. De lo contrario una parte de la corriente será transmitida por el eje del motor hacia la carga dependiendo de las impedancias con respecto a tierra de esta y del motor.

La corriente de modo común es la fuente de las corrientes parasitas del motor por lo que su mitigación también contribuye a la reducción de estas. Entre los métodos de mitigación de corrientes en orden de complejidad se encuentran los inversores multinivel, los filtros seno, los filtros  $dv/dt$ , los reactores  $dv/dt$ , las bobinas de choque  $dv/dt$  y los filtros de modo común (YASKAWA, 2005, p. 9).

En algunos casos se usan algunas de estas soluciones al tiempo e incluso se usan al tiempo también sistemas de eliminación de corrientes de rodamiento en el motor.

Los inversores multinivel generan señales PWM de varios niveles que se aproximan más a la señal senoidal que los inversores de dos niveles. La tensión de modo común está presente también en los inversores de varios niveles, sin embargo, estos presentan más escalones en la forma de la señal de tensión de modo común aproximándose más a una señal senoidal y reduciendo así el valor de los armónicos de frecuencias más altas reduciendo así las corrientes por capacitancias parasitas dentro del motor. Además, a velocidades de motor elevadas pueden eliminarse los escalones de los extremos reduciendo así la amplitud de la tensión de modo común (YASKAWA, 2005, p. 10-13).

El inversor multinivel se usa principalmente en variadores de media tensión siendo poco común en variadores de baja tensión. Se emplea como opción para mitigar la corriente de modo común y el fenómeno de onda reflejada principalmente en vez de la utilización de filtros de salida.

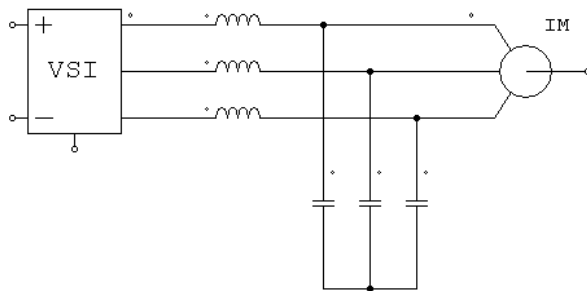


Los filtros senoidales son filtros pasivos que transforman las salidas PWM del motor en señales de forma casi senoidal reduciendo de forma notable la tensión de modo común y por lo tanto la corriente de modo común. Este es un beneficio que ofrecen estos filtros, pero por su costo, espacio que ocupan y reducción de eficiencia del sistema que manejan no es común su uso exclusivo como solución para mitigar corrientes de modo común, sino que se utiliza para mitigar esta y otro tipo de perturbaciones al mismo tiempo.

En la Figura 45 se observa el esquema de un filtro seno.

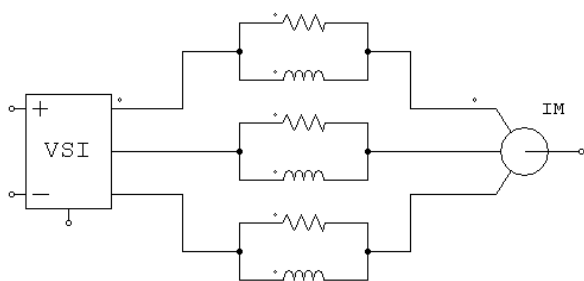
**Figura 45**

*Esquema de filtro seno*

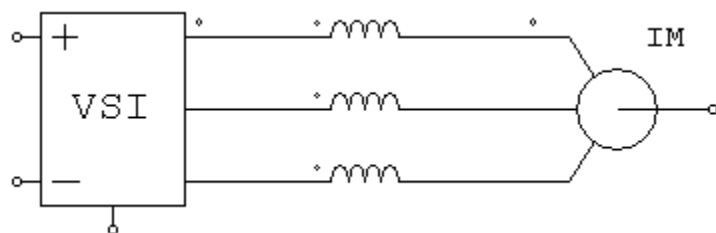


*Fuente. Autoría propia*

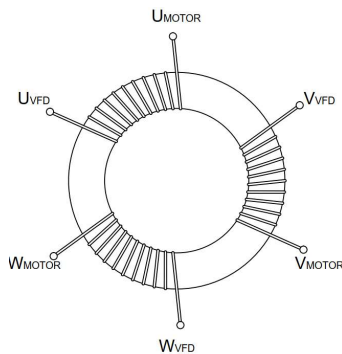
Los filtros  $dv/dt$  al aumentar el tiempo entre el cambio de estados de las salidas del inversor logran mitigar en cierta medida las corrientes de modo común ya que estas tienen una fuerte dependencia del  $dv/dt$ . A pesar de ser más económicos y pequeños que los filtros senoidales, la mitigación de la corriente de modo común no es el objetivo principal de este tipo de filtros. En la Figura 46 se observa el esquema de un filtro  $dv/dt$ .

**Figura 46***Esquema de filtro dv/dt**Fuente. Autoría propia*

Los reactores  $dv/dt$  son bastante similares a las reactancias de línea que se usan para mitigar armónicos. Incluso pueden ser iguales. Reducen las corrientes de modo común agregando inductancia a cada línea de alimentación del motor. En la Figura 47. Se observa el esquema de un reactor  $dv/dt$ .

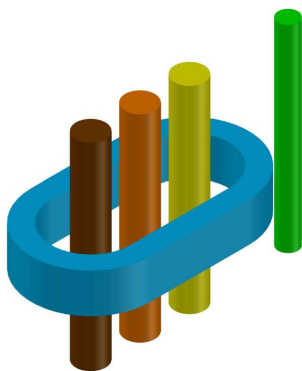
**Figura 47***Reactores  $dv/dt$* *Fuente. Autoría propia*

Las bobinas de choque ofrecen una alta impedancia a las corrientes de modo común, pero sin reducir la tensión de modo común. Son una de las alternativas más económicas para mitigar los efectos de las corrientes de modo común. En la Figura 48 se observa una bobina de choque.

**Figura 48***Bobina de choque**Fuente. Autoría propia*

Los filtros de modo común también llamados núcleos de modo común son el método más sencillo de reducción de corrientes de modo común. Estos no afectan el  $dv/dt$  de la señal de tensión, pero ofrecen una alta impedancia a la corriente de modo común. Pueden usarse varios al tiempo si es necesario (López, 2015, p. 67).

Por el interior del filtro deben pasar las líneas de alimentación del motor quedando por fuera el conductor de tierra como se observa en la Figura 49.

**Figura 49***Filtro de modo común y modo de instalación**Fuente. Autoría propia*

### ***Corrientes Capacitivas***

Las corrientes capacitivas en los cojinetes ( $I_{SR}$ ) se producen debido a la alta tensión de modo común que se presenta en los devanados del estator ya que esta hace que circule corriente hacia el rotor a través de la capacitancia parásita entre el devanado del estator y la superficie del rotor ( $C_{SR}$ ). Estas corrientes se distribuyen en dos caminos diferentes. El primer camino es el camino de retorno formado por la capacitancia entre el rotor y la carcasa ( $C_{RF}$ ) y el segundo camino es el formado por la capacitancia entre las pistas interiores y exteriores de los rodamientos ( $C_B$ ).

Dado que  $C_{SR}$  es mucho más pequeño que la combinación en paralelo de  $C_{RF}$  y  $C_B$ , la amplitud de  $I_{SR}$  es pequeña en comparación con la corriente de modo común total. Sin embargo, el flujo constante de esta corriente a través de la capacitancia del cojinete genera calor en el medio lubricante y los investigadores en este campo aún están investigando su influencia exacta en la falla del cojinete. Cabe señalar que la parte de la corriente que fluye a través del rodamiento depende de la velocidad y la carga mecánica sobre el eje. A bajas velocidades, el rodamiento podría estar representado por un cortocircuito que da como resultado un valor relativamente más alto de  $I_{SR}$  para fluir a través de él. Dado que esta corriente fluye a través de las partes metálicas del cojinete, se considera que su influencia en la película aislante es insignificante (YASKAWA, 2005, p. 7).

### ***Corrientes de Descarga Electrostática (EDM)***

Las corrientes de descarga electrostática ( $I_{EDM}$ ) se producen debido al almacenamiento de carga en la capacitancia parasita  $C_{RF}$  que genera la tensión de modo común. La tensión a través de  $C_{RF}$  es prácticamente la misma tensión del eje con respecto a tierra y se puede

acumular hasta alcanzar un nivel tal que provoque la ruptura del aislamiento de la película lubricante. Esta ruptura dieléctrica da como resultado que la carga almacenada a través de  $C_{RF}$  se descargue a través de la película aislante del cojinete, creando así lo que se conoce como corriente de cojinete EDM.

Dado que la capacitancia de  $C_{RF}$  es relativamente más alta que la de  $C_{SR}$ , la energía almacenada en  $C_{RF}$  puede ser lo suficientemente grande como para causar daños en los rodamientos. Las corrientes EDM no se generan si el eje del motor está conectado a tierra o si la velocidad de rotación es lo suficientemente baja como para que el conjunto de cojinetes de bolas entre en contacto con el marco del estator. La corriente EDM no fluye en todos los flancos de la tensión de modo común. El instante en el que fluye depende de cuando la película aislante sufre una ruptura dieléctrica y esto puede ser aleatorio.

Como la corriente de descarga electrostática es la que genera mayores problemas en los rodamientos del motor, se han desarrollado distintos tipos de soluciones para eliminarla como lo son los rotores aterrizados por medio de escobillas o los rodamientos cerámicos. Los primeros evitan que se cargue la capacitancia parásita  $C_{RF}$  mientras que los segundos al ser dieléctricos, evitan el paso de corriente (YASKAWA, 2005, p. 8).

### ***Corrientes de Modo Circulante***

La corriente de modo circulante  $I_{CMB}$  es relevante principalmente en motores de frame largo de más de 100 kW debido a la asimetría en el campo magnético entre los extremos del rotor. Esta asimetría induce una tensión en el eje a lo largo del rotor y es básicamente un fenómeno de inducción electromagnética opuesto al fenómeno de acople capacitivo que se presenta en las capacitancias parásitas. La tensión inducida depende de la excitación fundamental del motor. La corriente circulante fluye a lo largo del eje del

rotor, a través de los cojinetes y circula a través del marco del estator y regresa desde el otro extremo del cojinete (Quintero Sarmiento, Rosero Gacía, & Mejía López, 2013, p. 85-86).

### ***Corrientes de rotor aterrizado***

La corriente de rotor aterrizado  $I_{GR}$  se presenta cuando el rotor es aterrizado por medio de escobillas o cuando existe una mala conexión a tierra. En estos casos si el eje del motor está conectado a una carga mecánica que tiene una impedancia de tierra mucho más baja, la carga almacenada en  $C_{SR}$  encuentra una manera de fluir a través del eje hacia una tierra externa que tiene una impedancia más baja.

Las corrientes de rotor aterrizado pueden no ser un problema para el motor, pero si el acople entre motor y carga no es aislado se debe examinar que efectos puede producir en la carga ya que necesariamente se transmitirá a esta desde el eje del motor (YASKAWA, 2005, 8-9).

### **Ruido Acústico**

Los sistemas de variación de velocidad por frecuencia tienen la característica de emitir un nivel de ruido acústico que debe ser mitigado según el sitio de instalación. La reducción del ruido acústico es principalmente importante en entornos no industriales como viviendas, oficinas u hospitales entre otros donde se busca brindar cierto nivel de comodidad a las personas. En estos entornos las principales aplicaciones que usan variadores de frecuencia son las de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), los ascensores y los sistemas de bombeo.

El ruido acústico generado por sistemas de variación de velocidad se presenta fundamentalmente en los motores. El sonido en estos es notoriamente distinto al de los motores conectados a la red ya que es un poco más agudo debido a las frecuencias portadoras de los

inversores. El oído humano presenta una alta sensibilidad a estas frecuencias por lo que el ruido acústico generado por los motores alimentados por variador de frecuencia es fácil de oír incluso si tiene una baja amplitud. “Las señales de alimentación PWM pueden producir resonancia en el estator y en las aletas del motor provocando que trabaje como un amplificador” (Danfoss, 1999, p. 7).

En los variadores de frecuencia los principales causantes del ruido acústico son los ventiladores y es principalmente notorio cuando estos son de gran talla. Sin embargo, los campos magnéticos oscilantes dentro de los variadores de frecuencia también son una fuente de ruido acústico.

Los filtros usados a la entrada o a la salida de los variadores de frecuencia también son fuentes de ruido debido a sus inductancias. Cuando se utiliza un filtro seno se percibe que el motor suena como si estuviera conectado a la red y el filtro seno emite el ruido agudo que antes emitía el motor por lo que la fuente de ruido de alta frecuencia puede ser trasladada ya que por lo general el filtro está unido o bastante cerca a la salida del variador de frecuencia.

Para mitigar el ruido acústico que emiten los sistemas de variación de velocidad existen principalmente cuatro métodos que son el uso de frecuencia de conmutación elevada, el uso de frecuencia de conmutación aleatoria, la modulación de frecuencia de conmutación automática y la instalación de filtros LC a la salida del variador de frecuencia (Danfoss, 1999, p. 8).

### ***Uso de Frecuencia de Conmutación Alta Fija***

Llevar la frecuencia de conmutación a un valor imperceptible por el oído humano reduce notablemente el ruido acústico generado por sistemas de variación de velocidad, sin embargo, esta técnica agrega nuevos problemas que tienen soluciones complicadas o costosas. Los

principales son la pérdida de eficiencia del variador de frecuencia que implica una elevación en su temperatura de operación, y el aumento de ruido de radiofrecuencia que puede aumentar las corrientes de modo común en el motor y afectar equipos electrónicos sensibles que se encuentren cerca. Para elevar la frecuencia de conmutación es preciso cerciorarse de que no se presente el fenómeno de onda reflejada.

### ***Frecuencia de Conmutación Aleatoria***

Esta técnica modifica el ruido emitido por el motor variando la frecuencia de conmutación dentro de un rango de operación seguro para este. Este cambio en el ruido no necesariamente lo hace menos molesto.

### ***Filtro Senoidal***

La instalación de un filtro senoidal a la salida del variador produce que el motor emita un ruido similar al que produce cuando está conectado a la red. Mientras que el ruido adicional generado por la conmutación del inversor es emitido por el filtro seno. Esta solución puede ser útil siempre y cuando se reduzcan las molestias al trasladar la fuente del ruido. Sin embargo, es una solución costosa, requiere un mayor espacio para su instalación y reduce la eficiencia del sistema.

### ***Optimización Automática de Energía***

Las aplicaciones en las que es necesario mitigar el ruido acústico muchas veces son de torque variable por lo que la corriente se reduce bastante al bajar la velocidad (ver Figura 25). Mantener una relación tensión frecuencia lineal a baja velocidad en aplicaciones de torque variable produce una sobre magnetización en el estator produciéndose una emisión adicional de ruido acústico y una reducción en la eficiencia del sistema. Esto se soluciona reduciendo el valor



de la tensión hasta un valor apropiado que garantice el torque necesario y evite la sobre magnetización del estator.

### ***Modulación Automática de la Frecuencia de Conmutación***

Esta técnica eleva la frecuencia de conmutación a niveles no audibles cuando la carga es baja. Es muy útil también usar esta técnica en aplicaciones de torque variable ya que se cubre la mayor parte del rango de velocidad de los motores debido a que la carga elevada solo se presenta cerca al 100 % de la carga nominal y en este rango de velocidades se generan ruidos mecánicos que ayudan a ocultar el ruido de la conmutación de los inversores. Las desventajas de la frecuencia de conmutación alta se presentan con porcentajes de carga elevados que en muchos sistemas no se alcanzan por lo que la modulación automática solo mantiene una frecuencia de conmutación elevada a baja carga y la reduce gradualmente a medida que esta aumenta.

## Regeneración y Frenado

El frenado de un motor trifásico es necesario en varios tipos de aplicaciones en las que es básico detenerlo de forma instantánea, reducir su velocidad de forma rápida o controlarlo cuando la carga acelera al motor.

Una aplicación que requiere la detención instantánea del motor puede ser el sistema de seguridad de una sierra de madera ya que unos cuantos grados de giro de la sierra en contacto con la mano del operario pueden producirle una lesión de bastante gravedad.

Para comprender el frenado de las aplicaciones de alta inercia y de las aplicaciones que aceleran a los motores es preciso tener claros los conceptos de regeneración y de cuadrantes del motor ya que el comportamiento del sistema cambia notablemente con respecto a las aplicaciones convencionales cuando se realiza el frenado o cuando este se hace necesario (para el caso de las aplicaciones que aceleran al motor).

En la mayoría de las aplicaciones que involucran un motor eléctrico es clara la dinámica del flujo de potencia ya que la energía eléctrica llega al motor por los conductores, se convierte en energía mecánica y sale por su eje. Cuando el flujo de potencia cambia y la energía pasa de la carga al motor y de este a los conductores entonces se presenta el fenómeno de regeneración. El motor de inducción en marcha se magnetiza cuando se energiza por lo que está en capacidad de trabajar como generador si pasa de impulsar la carga a ser impulsado por esta.

Una máquina asíncrona actúa como generador cuando la velocidad de su eje supera a la velocidad de sincronismo, resultando entonces que el deslizamiento es negativo (ver ecuación (4)). Esto produce que la resistencia total del rotor sea negativa, lo que origina que la potencia en el entrehierro y la potencia eléctrica en el estator sean negativas. También sucede que la

resistencia de carga es negativa (ver ecuación (12)), lo que conlleva que la potencia mecánica interna y la potencia mecánica también sean negativas (Rodríguez Pozueta, p. 9).

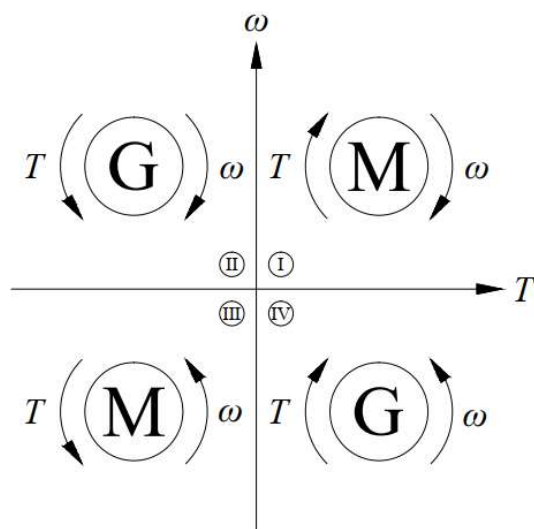
Las aplicaciones de elevación de carga presentan la particularidad de que cambian el flujo de potencia principalmente durante los descensos convirtiendo al motor en generador y haciéndose necesario también el frenado del motor.

La regeneración se presenta cuando el motor se desacelera por medio del variador de frecuencia a una velocidad mayor a la que se desaceleraría por sí mismo al quitarle la alimentación. También se presenta cuando la fuerza ejercida por la carga va en el mismo sentido de la fuerza del motor como por ejemplo un elevador en descenso.

Según su dirección de torque y velocidad el funcionamiento de un motor se puede localizar en uno de cuatro cuadrantes posibles. En la Figura 50 se observan estos cuadrantes junto con las direcciones de torque y modo de funcionamiento (motor o generador).

**Figura 50**

*Cuadrantes de funcionamiento de un motor eléctrico trifásico de inducción*



*Fuente:* Autoría propia

Existen tres categorías de aplicaciones en función del par, la velocidad y el cuadrante de trabajo. La primera categoría es la de las aplicaciones que trabajan en el cuadrante uno o el tres. Estos cuadrantes son los que no presentan regeneración y el flujo de potencia siempre va desde el motor hacia la carga. La mayoría de las aplicaciones de torque variable (bombas centrífugas, ventiladores) pertenecen a esta categoría, así como varias aplicaciones de torque constante como bandas transportadoras de un solo sentido o bombas de desplazamiento positivo (ABB, 2014, p. 307).

Para que una aplicación pertenezca a la primera categoría su desaceleración se debe realizar con sus propias pérdidas mecánicas (parada por inercia). Si la parada se realiza de forma forzada por rampa descendente de frecuencia puede pasar que la regeneración sea imperceptible si la aplicación es de baja inercia.

El tiempo de parada es muy importante para regular la regeneración. Entre mayor sea la inercia de la aplicación más largo debe ser el tiempo de parada si no se cuenta con un dispositivo de frenado ya que la energía de regeneración proveniente del motor eleva la tensión del bus DC del variador de frecuencia pudiendo llegar a destruir los bancos de condensadores si se supera el nivel de tensión nominal de estos.

La segunda categoría es la de las aplicaciones que rotan en un solo sentido, pero el flujo de potencia cambia de dirección cuando estas se desaceleran forzosamente por reducción de frecuencia por lo que trabajan en dos cuadrantes (ABB, 2014, p. 307).

El cambio de sentido del flujo de potencia se presenta debido a que una desaceleración forzada implica un cambio en el sentido del torque por lo que este será negativo con respecto a la dirección de la velocidad. Al multiplicar la velocidad por el torque negativo se tiene como

resultado una potencia negativa que se traduce como un cambio de dirección en el flujo de potencia.

En la Figura 50 se observa que las aplicaciones de la categoría dos trabajan en los cuadrantes uno y dos o tres y cuatro. En conclusión, esta categoría de aplicaciones gira en un solo sentido, pero su parada no se realiza con sus propias pérdidas mecánicas, sino que se realiza de manera forzada. Algunos ejemplos de este tipo de aplicaciones pueden ser los molinos de martillos o los ventiladores de gran talla que se frenan de forma forzada para evitar que giren por demasiado tiempo después de ser desenergizados sus motores.

La tercera categoría es la de las aplicaciones que trabajan en los cuatro cuadrantes ya que giran en ambos sentidos y se desaceleran de manera forzada. Estas aplicaciones por lo general involucran elevación de cargas como por ejemplo elevadores, ascensores y puentes grúa (ABB, 2014, p. 307).

En la Tabla 11 se encuentran los valores que pueden tomar la velocidad angular, el torque y la potencia en cada cuadrante. La potencia se toma como negativa cuando el flujo de esta va del motor al variador de frecuencia. Esto sucede en los cuadrantes dos y cuatro donde el motor trabaja como generador.

**Tabla 11**

*Valores de velocidad angular, torque y potencia en cada cuadrante*

Cuadrante	Velocidad angular	Torque	Potencia
I	$\omega > 0$	$T > 0$	$P > 0$
II	$\omega < 0$	$T > 0$	$P < 0$
III	$\omega < 0$	$T < 0$	$P > 0$
IV	$\omega > 0$	$T < 0$	$P < 0$

*Fuente.* Autoría propia

El momento de inercia ( $J$ ) es un concepto clave para comprender el tiempo de frenado de una carga alimentada por un motor eléctrico. El momento de inercia total de una aplicación es igual a la suma de los momentos del motor y la carga.

En el Apéndice N se encuentran las ecuaciones de momento de inercia rotacional de algunos sólidos. Para encontrar la inercia total de la aplicación es preciso descomponerla en varios sólidos y calcular la masa de cada uno. Además, se debe agregar el momento de inercia propio del motor.

Si se expresa el torque del motor en función de la frecuencia angular como lo muestra la ecuación (27) se tiene:

$$T_m(\omega) = J\alpha = J \frac{\omega_i - \omega_f}{t} \quad (27)$$

Tomado de: ABB. (09 de 09 de 2014). Libro de guías Técnicas de accionamientos de CA [Archivo PDF]. p. 311.

ABB Library:

[https://library.e.abb.com/public/dd0c813e2011033ec1257d4e00406241/TechnicalGuideBook\\_1\\_10\\_ES\\_REVH.pdf](https://library.e.abb.com/public/dd0c813e2011033ec1257d4e00406241/TechnicalGuideBook_1_10_ES_REVH.pdf)

Donde  $T_m(\omega)$  es el torque en función de la velocidad angular,  $J$  es el momento de inercia,  $\alpha$  es la aceleración angular,  $\omega_i$  es la velocidad inicial,  $\omega_f$  es la velocidad final y  $t$  es el tiempo de detención del sistema. Despejando  $t$  de la ecuación (27) se tiene la ecuación (28):

$$t = J \frac{\omega_i - \omega_f}{T_m(\omega)} \quad (28)$$

Tomando como ejemplo una aplicación de torque constante con un momento de inercia de  $200 \text{ kg m}^2$ , un torque  $120 \text{ N m}$ , una velocidad inicial de  $1500 \text{ RPM}$  y una velocidad final de  $0 \text{ RPM}$  se tiene despejando en la ecuación (29) que el tiempo de detención es:

$$t = 200 \text{ kgm}^2 \frac{2 \pi (1500 \text{ RPM} - 0 \text{ RPM})}{60 \cdot 120 \text{ Nm}} = 261.8 \text{ s} \quad (29)$$

Para el cálculo del tiempo de detención de aplicaciones de torque variable o de otro tipo se debe tener en cuenta que la función  $T_m(\omega)$  deja de ser constante. En la Figura 23 se observan las formas de las curvas de torque contra velocidad angular.

Los métodos de frenado de motores se pueden clasificar en tres tipos que son frenado dinámico, frenado regenerativo y frenado estático. El frenado dinámico es el que recibe la energía regenerada por el motor y la transforma en calor por medio de una resistencia. El frenado regenerativo es el que devuelve la energía a la red. El frenado estático es el que opera sin recibir la energía regenerada por el motor. A continuación, se tratarán los principales métodos de frenado.

### **Frenado por Resistencia**

Este método de frenado es de tipo dinámico y consiste en enviar la energía de regeneración a una resistencia y disiparla en forma de calor. Para poder utilizar una resistencia de frenado el variador debe contar con un chopper que por lo general se conecta al bus DC negativo. La resistencia se conecta al bus DC positivo y al chopper.

Cuando el motor disminuye su velocidad por la reducción de la frecuencia o el sentido del torque de la carga toma la misma dirección del giro del eje del motor, la tensión del bus DC comienza a elevarse y es cuando entra en acción el chopper de frenado conmutando la resistencia. El chopper no se activa continuamente, sino que tiene un ciclo útil de funcionamiento ya que ni él, ni la resistencia están dimensionados para trabajar al 100%.

El valor de las resistencias de frenado generalmente está en las guías de diseño de los fabricantes, pero también puede ser calculada con la ecuación (30).

$$R_b = \frac{(V_{dc\ max})^2}{P_{peak}} \quad (30)$$

Tomado de: Rockwell Automation. (2017). PowerFlex Dynamic Braking Resistor Calculator [Archivo PDF]. p. 35. Milwaukee. [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/pflex-at001\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/pflex-at001_-en-p.pdf)

Donde  $R_b$  es el valor de la resistencia de frenado,  $V_{dc\ max}$  es la tensión en el bus DC con la que se activa el chopper de frenado y  $P_{peak}$  es la potencia nominal del motor multiplicada por el porcentaje de sobrecarga máxima por la eficiencia del motor por la eficiencia del variador.

Expandiendo la ecuación (30) se tiene la ecuación (31):

$$R_b = \frac{(1.35 V_L S_{act(\%)})^2}{P_m M_{br(\%)} \eta_m \eta_{VFD}} \quad (31)$$

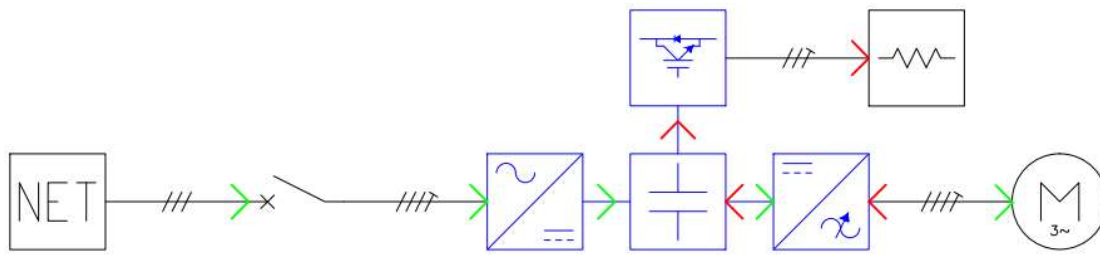
Donde  $V_L$  es la tensión de línea de la red que se multiplica por 1.35 para obtener la tensión típica de un rectificador trifásico de seis pulsos a plena carga,  $S_{act(\%)}$  es el porcentaje de incremento de tensión con el que se activa el chopper de frenado,  $P_m$  es la potencia nominal del motor,  $M_{br(\%)}$  es el porcentaje de sobrecarga máximo que puede exigir la aplicación,  $\eta_m$  es la eficiencia del motor y  $\eta_{VFD}$  es la eficiencia del variador de frecuencia.

En la Figura 51 se observa el diagrama unifilar de un sistema de variación de velocidad con resistencia de frenado. Para este y para los demás esquemas relacionados con regeneración de energía las flechas verdes indican la dirección del flujo de potencia proveniente de la red mientras que las flechas rojas indican el flujo de potencia proveniente del motor. Las flechas con color rojo y verde indican que la potencia puede provenir tanto de la red como del motor trabajando como generador.



**Figura 51**

Diagrama unifilar de sistema de frenado por resistencia



Fuente. Autoría propia

Si se tiene una red con tensión de línea de 480 VAC en un variador con eficiencia del 98% que activa su chopper de frenado al 125% de la tensión normal del bus DC y se tiene un motor de 11 kW con eficiencia del 93% en una aplicación que puede demandar un 110% de sobrecarga se tiene la ecuación (32):

$$R_b = \frac{(1.25 \cdot 1.35 \cdot 480 \text{ VAC})^2}{11 \text{ kW} \cdot 1.10 \cdot 0.93 \cdot 0.98} = 59.49 \Omega \quad (32)$$

Para calcular la potencia de la resistencia de frenado se debe conocer el ciclo útil con que trabajará ya que como se mencionó anterior mente estas no trabajan al 100%. En aplicaciones de dos cuadrantes un 10% del ciclo útil por lo general es suficiente para detener o reducir la velocidad del motor. En aplicaciones de cuatro cuadrantes que por lo general son de elevación de carga se utiliza un valor más alto como el 40% ya que en los descensos la carga se acelera por la gravedad y produce una mayor regeneración que una carga de alta inercia que solo necesita ser detenida.

La potencia de la resistencia ( $P_R$ ) se calcula de acuerdo con la ecuación (33).

$$P_R = P_{peak} \sqrt{\frac{\text{Ciclo Util}}{2}} \quad (33)$$

Para el ejemplo anterior si se trabaja con un ciclo útil de 10% se tiene la ecuación (34):

$$P_R = 11 \text{ kW} \cdot 1.10 \cdot 0.93 \cdot 0.98 \cdot \sqrt{\frac{0.1}{2}} = 2.47 \text{ kW} \quad (34)$$

El chopper de frenado tiene un valor máximo de corriente que debe ser conocido para dimensionar la resistencia. Si este valor no es suficiente para la aplicación puede ser necesario sobredimensionar el variador para poder manejar una corriente de frenado más alta. Si el variador tiene un chopper de frenado externo es suficiente con seleccionarlo de mayor capacidad. La corriente del chopper ( $I_{peak}$ ) se calcula de acuerdo con la ecuación (35).

$$I_{peak} = \sqrt{\frac{P_{peak}}{R_b}} \quad (35)$$

Para el ejemplo anterior la corriente del chopper es:

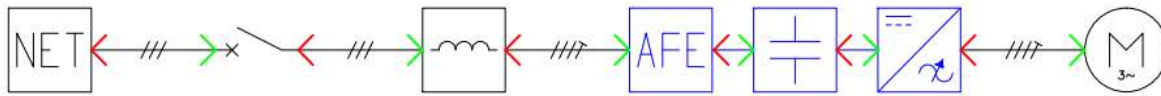
$$I_{peak} = \sqrt{\frac{11 \text{ kW} \cdot 1.10 \cdot 0.93 \cdot 0.98}{59.49 \Omega}} = 6.44 \text{ A} \quad (36)$$

### **Frenado con Rectificador AFE**

El frenado por medio de rectificador de frente activo (AFE) también conocido como rectificador PWM (Ver Figura 7) es un método de frenado regenerativo que permite devolver a la red de corriente alterna la energía regenerada por el motor. Esto se consigue reemplazando el rectificador normal de SCRs y/o diodos semi-controlado o controlado de seis pulsos por un rectificador con IGBTs teniendo la principal característica este último en ser bidireccional ya que permite el flujo de potencia en ambos sentidos. En la Figura 52 se observan los elementos que componen un sistema regenerativo con rectificador AFE. El flujo de potencia es totalmente bidireccional en todo el sistema.

**Figura 52**

*Diagrama unifilar de sistema regenerativo con rectificador AFE*



*Fuente.* Autoría propia

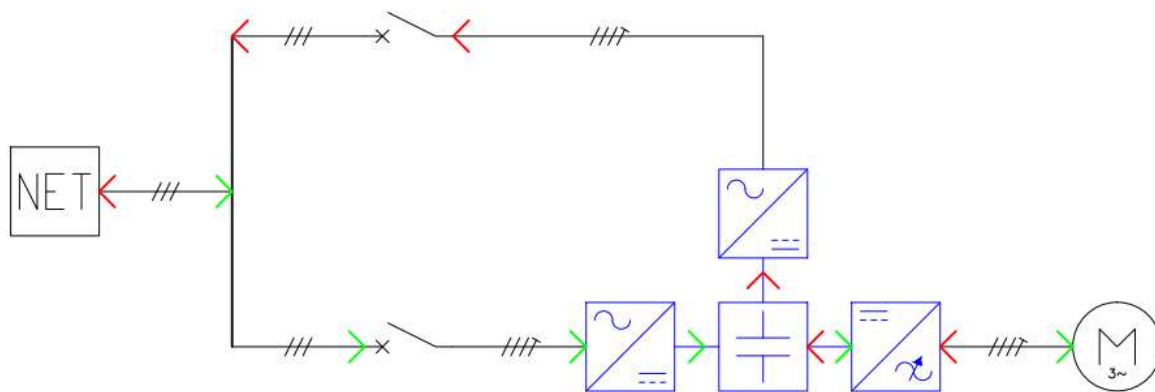
El rectificador de frente activo debe estar acompañado por un filtro L o LC a la entrada. La regulación de la tensión del circuito intermedio es la característica del rectificador AFE que permite devolver la energía a la red

### **Frenado con Módulo Regenerativo**

Los módulos regenerativos son elementos que se conectan al bus DC de los variadores de frecuencia y al percibir un incremento en la tensión del bus DC se accionan trabajando como inversores sincronizados con la red enviando la energía regenerada a esta. Este tipo de frenado a diferencia de el de frente activo es unidireccional entrando la potencia solo por el rectificador y saliendo solo por el módulo regenerativo. En la Figura 53 se observa un diagrama unifilar de un sistema de variación de velocidad con módulo regenerativo. En este sistema el flujo de potencia proveniente de la red llega por un lado, mientras que el flujo de potencia de regeneración es devuelto por otro.

**Figura 53**

Diagrama unifilar de sistema con módulo regenerativo



Fuente. Autoría propia

Para elegir entre este tipo de frenado y el AFE se deben tener bastantes elementos del sistema en cuenta para evaluar las ventajas y desventajas de cada uno.

### Frenado por Bus DC Compartido

El frenado por bus DC compartido es un método de frenado regenerativo bastante práctico para devolver la energía esta vez no a la red AC sino a una red DC. Consiste en conectar múltiples variadores de frecuencia por el bus DC de tal forma que cuando uno regenere su energía sea consumida por los que están trabajando en el primer o tercer cuadrante. Incluso existen sistemas con un único rectificador para múltiples variadores de frecuencia todos ellos conectados por el bus DC.

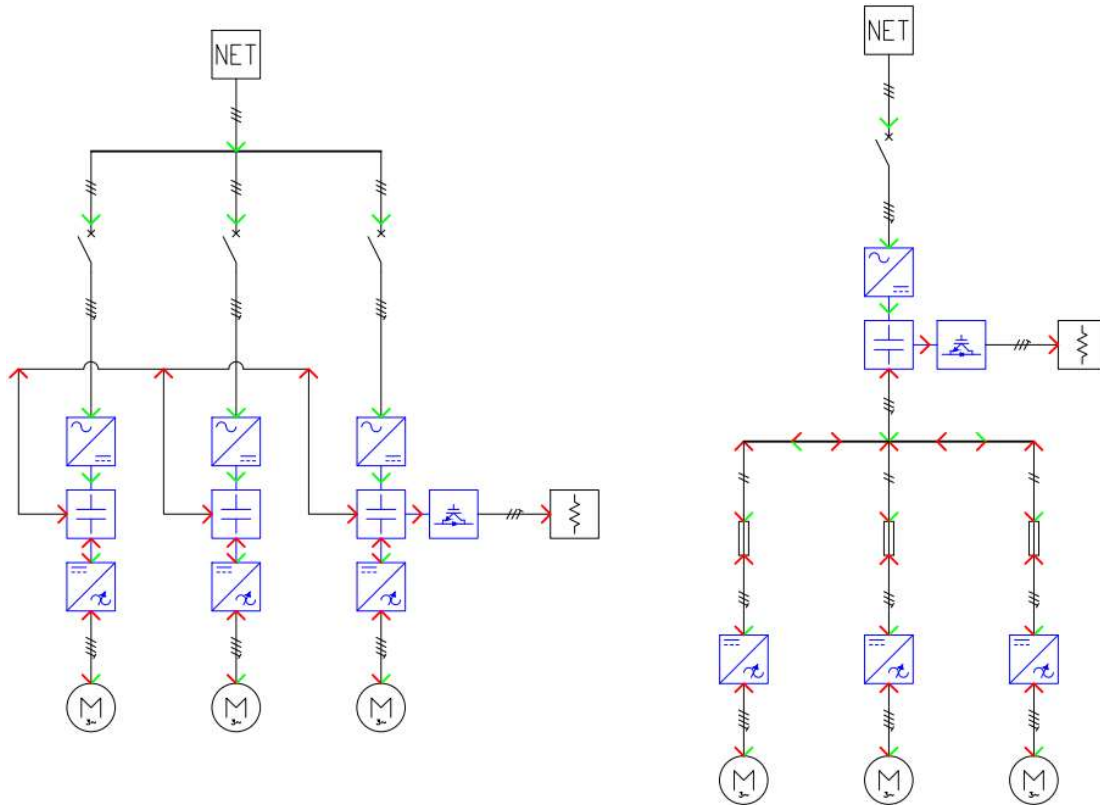
En este tipo de sistemas puede considerarse tener un frenado por resistencia o por módulo regenerativo para el caso en que se llegue a presentar que la regeneración sea demasiado alta para el consumo de energía del sistema y pueda haber una sobretensión en el bus DC común de los variadores.

En la Figura 54 se observan dos sistemas regenerativos equivalentes con bus DC compartido. El de la izquierda tiene unidos los buses DC de tres variadores de frecuencia

mientras que el de la derecha tiene un solo rectificador para los tres. En esta configuración el flujo de potencia proveniente de la red y el proveniente de la regeneración pueden tomar la misma dirección.

**Figura 54**

*Sistemas con bus DC compartido*



*Fuente. Autoría propia*

La resistencia de frenado funcionaría si en un momento de regeneración no existiera una demanda de energía por parte de los demás variadores o esta fuera inferior a la energía de la regeneración. La combinación del bus DC admite diversas topologías siendo incluso posible usarla con rectificador AFE o módulo regenerativo eliminando las resistencias de frenado.

### **Frenado por Contracorriente**

El frenado por contracorriente es un método estático que consiste en invertir dos fases de alimentación del motor para cambiar el sentido de giro del campo magnético con respecto

al sentido de giro del rotor. Esto produce que el motor trabaje con un deslizamiento superior a uno y ejerza un par de frenado (Rodríguez Pozueta, p. 13).

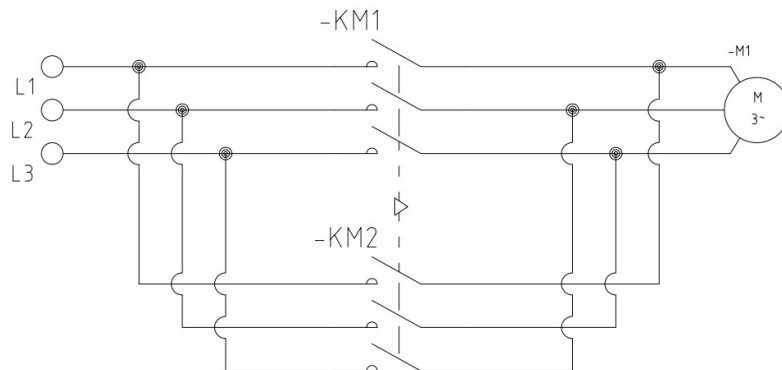
Durante el frenado por contracorriente el motor absorbe potencia mecánica por el eje y potencia eléctrica por los conductores al mismo tiempo. Esto produce una rápida elevación de la temperatura en el motor que en este caso hace las veces de disipador de calor por lo que este método puede averiarlo si no se aplica correctamente.

La Figura 55 muestra un sistema de inversión de giro en arranque directo. Este circuito es equivalente al circuito de inversión de giro, pero se diferencia en que el contactor de frenado se activa inmediatamente se abre el contactor de marcha mientras que en la inversión de giro se espera la detención del motor para activar el contactor que produce giro en el sentido inverso.

Existen aplicaciones de arranques directos que combinan el frenado por contracorriente con la inversión de giro. Esto implica un sobredimensionamiento de los contactores que pasan de tener una categoría de servicio AC3 a una categoría AC4. Además, se debe tener la certeza de que el motor no alcance temperaturas elevadas que puedan afectarlo.

**Figura 55**

*Sistema de frenado por contracorriente en arranque directo*



*Fuente. Autoría propia*

Las corrientes que se presentan en el frenado por contracorriente son superiores a las del arranque del motor. Cuando el frenado por contracorriente se aplica con variador de frecuencia este lo hace con tensión reducida lo cual es más favorable para el motor y evita daños por sobre corriente en el inversor. Los variadores de frecuencia no necesitan elementos adicionales para poder realizar un frenado por contracorriente ya que electrónicamente es posible cambiar la secuencia de las fases y la amplitud de la tensión del motor.

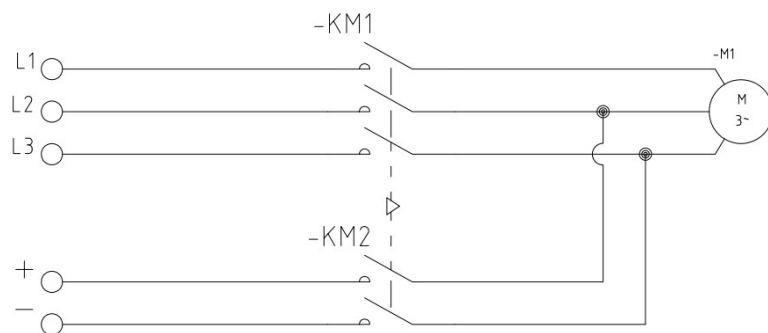
### **Frenado por Inyección de Corriente Continua**

El frenado por inyección de corriente continua es un método estático que consiste en inyectar corriente continua por dos de las tres fases del motor. Esto produce un campo magnético estático que genera un par que trata de evitar las variaciones de flujo haciendo oposición a cualquier movimiento del rotor (Rodríguez Pozueta, p.16).

En la Figura 56 se observa el esquema eléctrico de un sistema de freno por contracorriente.

**Figura 56**

*Diagrama de frenado por corriente continua en arranque directo*



*Fuente. Autoría propia*

La inyección de corriente continua se debe realizar con tensión reducida buscando no sobrepasar la corriente nominal del motor durante el frenado. Este método de frenado puede ser aplicado en un arranque directo usando una fuente DC externa. Los variadores de frecuencia cuentan con funciones de frenado DC ya que es sencillo para ellos inyectar corriente DC por el inversor.

### **Freno Electromecánico**

El freno electromecánico es un dispositivo adicional del motor que permite detener el eje de forma mecánica mientras que su activación se realiza de forma eléctrica por medio de un relé. Este método de freno puede ser usado en caso de emergencia cuando un método de frenado eléctrico no funcione u ocurra un corte del suministro de energía.

El freno electromecánico por lo general trabaja normalmente cerrado y debe ser energizado para abrirse y permitir el giro del motor. De esta forma detendrá el eje en el momento de un corte de suministro eléctrico. Esto resulta de gran utilidad por ejemplo en el movimiento de cargas verticales que caerían irremediablemente ante un corte de energía.

Los variadores de frecuencia cuentan con funciones que les permiten trabajar coordinadamente con un freno electromecánico. Es de vital importancia que el motor se



encuentre magnetizado antes de soltar el freno para que tenga un torque que evite que la carga caiga cuando el freno se desactive.

## **Consideraciones para el Diseño de Sistemas de Variación de Velocidad**

El diseño de sistemas de variación de velocidad implica tener en cuenta aspectos como el entorno en que se encontrará, las cualidades del suministro eléctrico y de la puesta a tierra, los límites de perturbaciones de radiofrecuencia y de distorsión armónica permitidos y el tipo de comunicación que se va a usar entre otros.

### **Cualidades del Sistema de Variación de Velocidad**

Un sistema de variación de velocidad puede llegar a requerir de una gran inversión por lo que se espera que su diseño e implementación garanticen fiabilidad, durabilidad, eficiencia, seguridad y rápido retorno de inversión.

#### ***Fiabilidad***

La fiabilidad o también conocida como confiabilidad es tener la probabilidad más baja posible de que el sistema presente una falla que genere trastornos en el proceso. Una falla en el sistema se puede presentar por causas externas como defectos en el suministro eléctrico, la mala selección de un componente, conflicto entre componentes del sistema, falla en la carga o falta de un adecuado mantenimiento.

Un sistema de variación de velocidad fiable es aquel que realiza correctamente su tarea (sin pérdidas ni daño en productos si es el caso) y no produce paradas en la planta debidas a fallas en él.

#### ***Durabilidad***

La durabilidad es la garantía de que el sistema de variación de velocidad contará con todos sus componentes principales en buen estado durante el periodo de vida útil estimado. Al igual que en la fiabilidad, esto se garantiza por medio de un correcto diseño, elección de

componentes de alta calidad y un correcto mantenimiento. La durabilidad también puede verse afectada por causas externas al sistema.

Una forma gráfica de entender los conceptos de durabilidad y fiabilidad es la denominada curva de la bañera expuesta en la Figura 57 donde se puede observar un ejemplo. La curva de la bañera varía según el sistema estudiado y las condiciones en que va a trabajar.

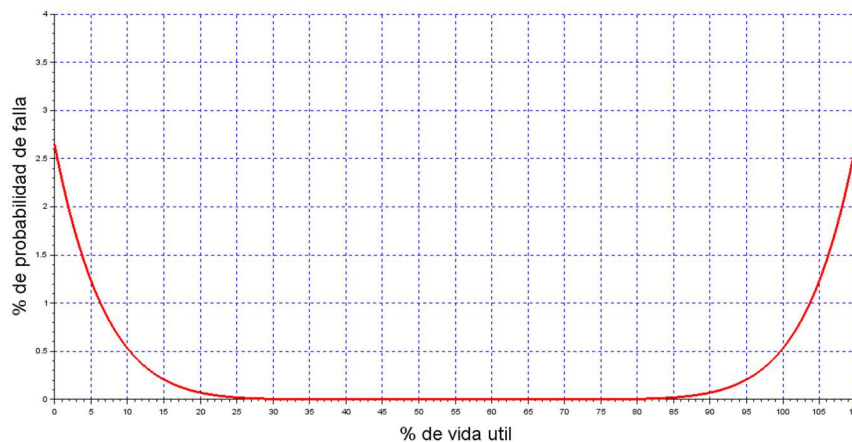
Al principio un sistema tiene altas posibilidades de fallo debido a posibles fallas de fabricación en sus componentes o en su diseño, con el tiempo el sistema puede ser mejorado mientras que las posibilidades de fallo de sus componentes descienden muy notoriamente.

Posteriormente el sistema ya optimizado funciona de forma muy confiable hasta que el desgaste de las partes empieza a hacer efecto y empiezan a fallar los componentes cada vez más.

La vida útil de un sistema no se cumple necesariamente cuando ya no tiene reparación sino cuando empieza a presentar fallos continuos que afectan el proceso en el que está trabajando. Entre más importante sea el proceso y más costos represente una falla en el proceso con respecto al costo del sistema de variación de velocidad más rápido debe ser reemplazado este.

### Figura 57

*Modelo de curva de la bañera*



*Fuente. Autoría propia*

## ***Eficiencia***

Cuando se habla de eficiencia en un sistema de variación de velocidad se puede hacer referencia a la eficiencia energética o a la eficiencia del desempeño del sistema de variación de velocidad en la realización de su tarea.

En el caso de la eficiencia energética esta depende de la eficiencia de sus componentes, del diseño, del monto de la inversión que se desee realizar y de la programación del variador de frecuencia principalmente.

Por ejemplo, un sistema de bombeo de presión constante con alternación de dos bombas es más eficiente si cada bomba tiene un variador de frecuencia que si solo hay un variador para las dos bombas. Sin embargo, el incremento en el costo del sistema es significativo.

La eficiencia en el desempeño es la efectividad que tiene el sistema para realizar su tarea. Por ejemplo, un elevador de carga efectivo es el que sube y baja rápidamente y sus paradas son bastante suaves.

## ***Seguridad***

Un sistema de variación de velocidad debe ser seguro para el personal operativo, de mantenimiento y en general para el personal cercano a este. Debe cumplir con la normatividad exigida por el país donde se encuentra y cumplir con elementos básicos de seguridad como cubrimiento de partes energizadas, señalización, paradas de emergencia, cubrimiento de partes móviles etcétera.

El sistema de variación de velocidad también debe ser seguro para los bienes que lo rodean y para el producto con que trabaja garantizando que estos no sufran daños por causa de él.

### ***Retorno de Inversión***

Cuando se diseña un sistema de variación de velocidad muchas veces se busca reemplazar un sistema anterior que incluso no implica variación de velocidad. La idea es compensar el costo superior del sistema de variación de velocidad con la disminución del costo de la energía eléctrica consumida y/o con el aumento de la velocidad de producción gracias al sistema.

El sistema de variación de velocidad debe garantizar un rápido retorno de inversión comparando su costo y ventajas con respecto a un sistema ya existente o a otro diseño para la misma solución.

Un buen ejemplo es un sistema de presión constante por recirculación con válvula proporcional que genera un alto desperdicio de energía y es fácilmente reemplazado por un sistema de variación de velocidad con un ahorro de energía bastante notorio.

### **Selección de Elementos del Sistema**

El diseño de un sistema de control de velocidad empieza por la correcta selección de los componentes de este como lo son el variador de frecuencia, el motor, las protecciones eléctricas, los conductores y los accesorios necesarios. Esta selección se realiza conociendo previamente las condiciones con que debe cumplir el sistema de variación de velocidad.

### ***Selección del Motor***

Por lo general el primer elemento que se selecciona en un sistema de variación de velocidad después de definida la carga es el motor ya que este debe cumplir con las condiciones mecánicas exigidas por el proceso y este prácticamente es el punto de partida.

Los primeros parámetros que se deben tener en cuenta para la selección del motor son el torque y la velocidad requeridos. Algunas veces son fáciles de calcular otras veces se conocen

empíricamente o se encuentran en hojas de datos. Los variadores de frecuencia calculan el torque del motor cuando está en marcha y pueden servir como herramienta para seleccionar el motor si se pueden realizar pruebas con un motor sobredimensionado.

El rango de velocidad soportado por motores de inducción convencionales por lo general va desde valores cercanos al 20% de la frecuencia nominal hasta el 150% de esta. Para velocidades más bajas puede ser necesario buscar motores especiales con un rango de velocidad mayor como por ejemplo los motores vectoriales que pueden mantener el torque nominal incluso a cero Hz.

Si la aplicación es de torque variable lo típico es que la plena carga se presente a la frecuencia nominal y que esta no se sobrepase ya que el motor no tendrá la capacidad de ofrecer la potencia necesaria para trabajar a una velocidad mayor. Para velocidades bajas la corriente disminuirá de forma similar al torque siendo muy baja y disminuyendo considerablemente la temperatura del motor por lo que la baja velocidad del ventilador puede no ser un inconveniente. Sin embargo, es aconsejable solicitar al fabricante información sobre la necesidad de añadir un moto ventilador al motor para refrigerarlo.

Si la aplicación es de torque constante se debe tener en cuenta que el par caerá de forma cuadrática después de alcanzarse la velocidad nominal del motor por lo que si se desea pasar de la velocidad nominal la exigencia de torque debe ser menor. De lo contrario la máxima carga también deberá presentarse a la máxima velocidad. Para velocidades bajas (por lo general menos del 60% de la frecuencia nominal) se hace obligatorio el uso de ventilación forzada externa al motor para evitar su recalentamiento por baja velocidad del ventilador ya que la corriente al igual que el torque tiende a ser constante.

Una vez definido el rango de velocidad en que trabajará el motor se debe decidir si es necesario usar un reductor o un motor de varios polos para velocidades bajas o un multiplicador de velocidad o un motor de alta frecuencia para velocidades altas.

Los motores de varios polos como por ejemplo ocho son más caros, más grandes e ineficientes, pero por lo general resultan más económicos que un motor convencional de cuatro polos, por ejemplo, con reductor además de darle más simplicidad al sistema.

El motor de varios polos sin reductor entrega toda su potencia directamente a la carga mientras que con el reductor la potencia que llega a la carga es la del motor multiplicada por la eficiencia del reductor. Si la demanda de potencia de la carga es muy cercana a la del motor puede llegar a ser necesario sobredimensionar el motor para compensar las pérdidas del reductor. Por lo tanto, la mayor ineficiencia del motor de varios polos puede verse compensada con la pérdida de potencia del reductor.

Por lo general la decisión de usar un reductor se toma cuando la velocidad requerida está por debajo de la de un motor de ocho polos (aproximadamente 900 RPM a 60 Hz) Ya que más allá de este valor los motores suelen ser fabricados sobre pedido y su costo e ineficiencia pueden estar por encima que el de un conjunto de motor de pocos polos con reductor. Si se va a usar un reductor se debe tener en cuenta su construcción y el tipo de engranajes. Para el caso de los reductores sinfín-corona se debe tener en cuenta que solo permiten el paso de energía mecánica del eje del motor a la carga, pero no en sentido inverso.

En el caso de velocidades altas el uso de multiplicadores de velocidad con respecto a los motores especiales de altas velocidades presenta las mismas desventajas que las de los reductores con respecto a los motores de varios polos. Los motores de altas velocidades generalmente son

de dos polos y funcionan a frecuencias elevadas. Un motor de dos polos a 500 Hz tiene una velocidad síncrona de 30000 RPM.

Ya definidos el torque y la velocidad necesarios del motor se puede saber la potencia y se tendrán claros los principales parámetros mecánicos del sistema. Los parámetros eléctricos se definen a partir de los parámetros mecánicos y el valor de tensión con que cuenta la acometida del sistema. Para trabajo con variadores de frecuencia preferiblemente el motor debe tener una tensión nominal un poco menor o igual a la de la red. Para trabajo sin variador de frecuencia es ideal que el motor tenga la misma tensión nominal de la red.

Aunque aún no se ha seleccionado el motor se puede tener una idea de la corriente que consumirá el sistema y se puede evaluar si se cuenta con la potencia necesaria en la subestación (para el caso de motores grandes), el calibre de los conductores y si será necesario instalar una solución de mitigación de armónicos.

El siguiente paso es seleccionar que tipo de motor es el indicado según el tipo de aplicación y ambiente en que va a trabajar. Es de suma importancia saber si el motor va a trabajar en un área clasificada ya que existen motores especializados para cada tipo de área y cuentan con características como baja temperatura de funcionamiento, ser a prueba de polvo, no generar chispa, etcétera.

Siempre que sea posible es mejor utilizar un motor diseñado específicamente para el tipo de aplicación y de industria en que se va a trabajar. Por ejemplo, motores de ciclo minero, motores de ciclo marino y motores para la industria de alimentos entre otros. Estos motores cuentan con características que les permiten integrarse mejor al sistema que un motor de uso general. Sin embargo, en muchos casos se deben importar e incluso se deben mandar fabricar por lo que su disponibilidad es mucho menor que la de los motores de uso general.



Como consideraciones eléctricas se debe tener en cuenta que el motor debe tener como mínimo un aislamiento tipo F y un rise de temperatura de 80°C.

En las consideraciones mecánicas se debe tener en cuenta el tipo de carga (axial o radial) y el tipo de torque de arranque, aunque el segundo no es tan evidente usando variador de frecuencia en comparación con un arranque directo.

Según el entorno en que va a trabajar el motor se debe tener en cuenta su grado de protección, el tipo de refrigeración que va a emplear, la temperatura del ambiente y la altitud sobre el nivel del mar. Los dos últimos parámetros sirven para definir si es necesario hacer un derrateo del motor y tal vez se deba usar un motor de una potencia nominal superior.

**Tabla 12**

*Factor de corrección para derrateo de motores*

T (°C)	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,94
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,91
25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,93	0,89
30	1,00	1,00	1,00	0,96	0,92	0,90	0,86
35	1,00	1,00	0,95	0,93	0,90	0,88	0,84
40	1,00	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,80
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,81	0,78
50	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73
60	0,83	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70

*Fuente.* WEG. (2012). Specification of Electric Motors [Archivo PDF]. p. 44. WEG:

<http://www.weg.kiev.ua/pdf/WEG-specification-of-electric-motors-manual-en.pdf>

La Tabla 12 muestra el factor de corrección por el que se debe multiplicar la potencia de un motor eléctrico de acuerdo con la temperatura y la altura sobre el nivel del mar (Es recomendable usar la tabla de corrección de cada fabricante).

Por lo general los motores están diseñados para trabajar máximo a 1000 metros sobre el nivel del mar con una temperatura de ambiente de 40°C sin que su potencia máxima de trabajo tenga que ser disminuida. Existe la posibilidad de mandar fabricar motores de grandes potencias diseñados para trabajar a mayores alturas sobre el nivel del mar sin tener que realizarse un derrateo en ellos. La Figura 58 es la placa de datos de un motor diseñado para trabajar a 2600 metros sobre el nivel del mar a 40°C con un factor de corrección de uno.

**Figura 58**

*Placa de Motor WEG fabricado para trabajo a 2600 metros*



*Fuente.* Autoría propia

### ***Selección del Variador***

Después de conocerse el modelo exacto del motor y contar con sus datos de placa es posible realizar la selección del variador. Sin embargo, el tipo de aplicación es el que define en principio el tipo de variador que se seleccionará ya que al igual que en el caso de los motores es preferible seleccionar un variador diseñado específicamente para el tipo de aplicación en que se va a trabajar.

Los variadores de uso general son más comunes para aplicaciones de torque constante mientras que los variadores especializados son más comunes en aplicaciones de torque variable. Sin embargo, los variadores especializados pueden usarse en aplicaciones de torque constante sobredimensionándose.

Por ejemplo, un variador especial para aplicaciones de bombeo se puede usar en un sistema de bombas de desplazamiento positivo si se sobre dimensiona para que pueda tener una sobrecarga de 150% durante un minuto. En otros casos una aplicación de torque constante como un compresor de tornillo puede ser operado con un variador de torque variable sin sobredimensionarse si se garantiza que siempre arrancará sin carga.

Después de seleccionada la línea de variador de acuerdo con la aplicación, lo primero que se debe tener en cuenta es el número de fases de alimentación y tensión de alimentación de la red que debe estar dentro del rango de tensión del variador.

Los variadores pueden estar diseñados para una alimentación trifásica, monofásica o de corriente continua. Si la fuente de alimentación es alterna siempre es preferible usar las tres fases si estas están disponibles. Si solo se cuenta con una o dos fases se deberá usar un variador monofásico, pero estos solo están disponibles en bajas potencias y por lo general manejan tensiones de entrada y de salida de 200VAC a 240VAC. Vale la pena aclarar que estos variadores son por lo general de entrada bifásica y salida trifásica siendo los variadores de salida monofásica bastante escasos.

En ocasiones la acometida disponible no cuenta con tres fases y el motor es de una potencia superior a la de los variadores monofásicos disponibles en el mercado. En este caso es posible usar un variador trifásico sobredimensionado un 150%. El sobredimensionamiento se realiza porque la corriente de entrada será superior y podría afectar al rectificador.

Por otra parte, los variadores monofásicos cuentan con condensadores más grandes que los trifásicos de la misma potencia ya que el rizado de un rectificador monofásico es bastante superior, por lo que en este tipo de adaptación puede ser necesario usar condensadores en paralelo en el bus DC y probablemente un circuito de precarga para evitar las elevadas corrientes que generan los condensadores cuando están descargados y se energizan.

Los variadores alimentados por corriente continua generalmente son diseñados para trabajar en instalaciones de energía fotovoltaica o en sistemas modulares que cuentan con un solo rectificador para varios variadores. Un variador estándar de alimentación por corriente alterna puede ser energizado por corriente continua en el bus DC sin problemas siempre y cuando la tensión este en el rango del variador (270-340 VDC para variadores a 200-240 VDC y 513-679 VDC para variadores a 380-480 VAC). Es muy importante que la tensión de rizado sea mínima.

La salida del variador puede ofrecer una tensión mucho menor que la entrada tanto así que un motor de 220 VAC se puede configurar correctamente en un variador de 440 VAC con su tensión de red nominal siempre y cuando el variador tenga la capacidad de suministrar la corriente que exige el motor. Sin embargo, es una práctica poco común ya que el variador se estaría usando a la mitad de su capacidad de potencia por lo que tendría que sobredimensionarse de forma exagerada y además la mayoría de los motores de uso industrial que trabajan a 220 VAC también tienen modos de conexión para trabajar a tensiones más altas como 380 VAC o 440 VAC.

El caso contrario de alimentar un motor de 440 VAC con un variador de 220 VAC en principio no es posible ya que el variador no podría llegar a la tensión nominal del motor y ni siquiera aceptaría en su programación que se le ingresara un valor de tensión tan elevado con respecto a su tensión nominal. Sin embargo, se podría programar el variador poniéndole unos

valores de frecuencia y tensión nominales de la mitad de los valores reales del motor pudiéndose trabajar este a la mitad de su velocidad. Este caso solo es posible mas no es práctico ya que no permite una configuración óptima del motor en el variador y solo permite usar el motor a la mitad de la potencia.

Una vez seleccionada la tensión nominal del variador se debe tener en cuenta la corriente a plena carga del motor y seleccionar un variador que tenga una corriente de salida por encima de esta. En algunos casos la mejor selección no implica que el variador y la aplicación tengan el mismo tipo de sobrecarga.

En la Tabla 13 se puede observar cómo dimensionar el variador de acuerdo con la aplicación. Sin embargo, es recomendable acudir siempre que se pueda a la guía de diseño del variador para trabajar con los valores de corriente que recomienda el fabricante según el tipo de aplicación ya que las tensiones de red y nominal del motor también influyen en el valor de corriente máximo que puede suministrar el variador y no siempre se cumple que un variador tenga un 136.36% más de capacidad de corriente para aplicaciones de torque variable que para aplicaciones de torque constante.

**Tabla 13***Dimensionamiento de variador de acuerdo con la aplicación*

		Aplicación	
		Torque constante	Torque variable
Variador	Torque constante	Variador con corriente nominal mayor o igual a la del motor	Variador con corriente de sobrecarga normal (o torque variable) nominal igual a la del motor. Generalmente 136.36% mayor que la corriente nominal de sobrecarga alta
	Torque variable	Variador sobredimensionado mínimo un 136.36% de la corriente nominal del motor para que pueda tener sobrecarga de 150% durante un minuto	Variador con corriente nominal mayor o igual a la del motor

*Fuente.* Autoría propia

Es muy importante tener en cuenta que el dimensionamiento del variador se hace a partir de la corriente y no de la potencia ya que los valores de corriente de dos motores de la misma potencia nominal pueden ser bastante diferentes dependiendo de su número de polos, de su eficiencia y de su frecuencia nominal principalmente. Es por esto por lo que la potencia se debe tomar como una referencia mas no como un parámetro para seleccionar un variador de frecuencia.

Después de dimensionado y seleccionado el tipo de variador se puede proseguir con la evaluación de las características que debe cumplir para funcionar correctamente en su entorno. Estas características son el tipo de encerramiento, su modo de instalación, la temperatura

ambiente, la humedad relativa y la altura sobre el nivel del mar. La distancia de cable hasta el motor también puede considerarse como una característica del entorno del variador.

**Tipos de Encerramiento para Variadores.** Los variadores de frecuencia cuentan principalmente con tres tipos de encerramientos que dependen principalmente de la potencia y el lugar de instalación. Para aumentar su resistencia a los ambientes hostiles también pueden contar con tarjetas electrónicas barnizadas.

Los variadores con grados IP bajos como IP20 o IP00 están diseñados para funcionar dentro de un armario. Existen también variadores refrigerados por agua para funcionar dentro de armarios IP66 en ambientes severos.

Generalmente este tipo de variadores cuentan con la opción de instalar el display en la puerta del tablero por medio de un kit de montaje remoto para poder monitorear su funcionamiento.

Los variadores IP66 por lo general vienen en bajas potencias y se utilizan para trabajar de forma descentralizada en intemperie y/o en ambientes con elevados niveles de humedad y contaminación en el ambiente. Sin embargo, si trabajan en intemperie es recomendable que cuenten con una sombra que los proteja de la radiación solar a menos que el fabricante especifique que toleran a esta.

Los variadores con encerramientos medios como IP54 en potencias altas de baja tensión al igual que los variadores de media tensión están diseñados para funcionar en centros de control de motores o en ambientes con bajo nivel de humedad y contaminación. Cuando es necesario utilizarlos en intemperie se deben instalar dentro de un shelter con aire acondicionado. Esta aplicación es común en la industria petrolera. Power Electronics cuenta con variadores de media tensión para intemperie. Este tipo de solución ofrece costos más bajos de instalación y de

operación, pero presenta el inconveniente de tener dependencia del clima para poder realizar tareas de mantenimiento.

Los variadores de bajas potencias con este grado de protección pueden ser instalados sin necesidad de envolvente en ambientes con bajo nivel de humedad y contaminación. En otros casos pueden ser variadores con un IP bajo dentro de un armario de IP medio ensamblado por el fabricante junto con otros elementos como protecciones eléctricas y ventilación. Este tipo de encerramiento de variador es muy útil para ahorrar espacio en cuartos de control de motores.

En la Figura 59 se observan múltiples tipos de encerramientos de variadores de frecuencia Vacon.

#### **Figura 59**

*Variadores Vacon con distintos tipos de encerramiento*



*Fuente.* MINING TECHNOLOGY. Vacon. Mining technology. [En línea] 2018. [Citado el: 15 de marzo de 2018.]

<http://www.mining-technology.com/contractors/power/vacon/>

Existen algunos casos especiales en los que un variador debe estar en una atmósfera explosiva para lo que se puede usar un variador IP00 dentro de una caja explosion proof como el de la Figura 60.



**Figura 60***Variador con envoltente explosion proof*

*Fuente.* Eaton. (2022). ACE10 Explosionproof Variable Frequency Drives. Recuperado el 11 de Octubre de 2022, de Eaton Powering Business Worldwide: <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/industrial-control--drives--automation---sensors/ace10-series-explosionproof-variable-frequency-drives.html>

**Derrateo del Variador.** Al igual que los motores eléctricos los variadores pueden requerir un derrateo si van a trabajar a una altura sobre el nivel del mar superior a los 1000 metros y/o si van a trabajar a temperaturas ambiente superiores a los 40°C.

Una altura elevada sobre el nivel del mar produce disminución en la presión atmosférica y en la densidad del aire. La primera produce pérdida de aislamiento en el aire y facilita la presencia de un arco eléctrico dentro del variador. La segunda produce un intercambio de calor deficiente evitando una correcta disipación de calor en el variador.

Una temperatura elevada produce un aumento notable en el deterioro de los semiconductores y los condensadores del variador siendo necesario su derrateo para que tenga un tiempo de vida útil aceptable.

Por lo general los variadores de frecuencia deben tener un derrateo de 1% por cada 100 metros de altura sobre el nivel del mar por encima de los 1000 metros y 1% por cada grado centígrado por encima de los 40°C. Los límites de funcionamiento pueden variar según el fabricante.

El derrateo suele ser necesario también según el valor de la frecuencia de conmutación y su modo de conmutación. Las guías de diseño suelen contener los valores de derrateo que se deben aplicar a los variadores de frecuencia según sus condiciones de funcionamiento.

Para evitar un sobredimensionamiento exagerado no se debe derratear el variador con los parámetros de placa del motor sino con los que manejará después de haberse realizado su derrateo.

**Refrigeración del Variador de Frecuencia.** Es muy importante tener en cuenta que una adecuada refrigeración del variador puede hacer que este trabaje en un rango de temperatura que le permita eliminar o disminuir el valor de derrateo y además puede prolongar su vida útil ya que el calor en los semiconductores y condensadores de los variadores es un factor determinante para su desgaste.

Si el variador se utiliza dentro de un armario este será el mayor generador de calor. Los métodos de refrigeración más comunes en armarios eléctricos son los ventiladores, los aires acondicionados, los intercambiadores aire-agua y los intercambiadores aire-aire. El sistema de refrigeración se debe escoger de acuerdo con el nivel de protección IP que puede garantizar y a su capacidad de refrigeración. Es muy importante también guardar las distancias del variador de frecuencia a otros elementos del tablero según las recomendaciones del fabricante.

Para los variadores auto soportados de tamaños grandes existen sistemas de ductos filtrados que toman el aire fresco del exterior para enfriar el variador y ductos que evacuan el

aire caliente al exterior para evitar altas temperaturas en el cuarto eléctrico. Para variadores auto soportados pequeños puede ser necesaria la instalación de un sistema de ventilación o de aire acondicionado en el cuarto eléctrico para mantener una temperatura aceptable.

**Consideraciones para la Alimentación del Variador.** Como ya se vio en el capítulo Efectos De Los Variadores De Frecuencia En La Fuente De Alimentación, La Carga Y El Entorno, el variador genera perturbaciones en la red eléctrica por lo que se debe tener claro que nivel de distorsión armónica y de ruido de radio frecuencia puede tolerar la instalación eléctrica y el entorno para saber si se debe usar un método de mitigación y cuál debe ser este.

**Consideraciones para la Salida del Variador.** La salida de los variadores de baja tensión como se vio es de tipo PWM por lo que es muy importante tener en cuenta los fenómenos que este tipo de señal genera sobre el motor tales como las sobre tensiones producidas por el fenómeno de onda reflejada, las corrientes de modo común en los rodamientos del motor y el ruido acústico del motor. En algunos casos se desea reutilizar un motor con un aislamiento no apto para variador de frecuencia por lo que puede hacerse necesario el uso de un filtro seno que no habría que usar con un motor moderno.

La distancia del cable del variador al motor es un parámetro muy importante ya que para una distancia elevada es factible que se presente el fenómeno de onda reflejada que puede generar averías en el aislamiento del motor a largo plazo. Existen varias formas de controlar este fenómeno como por ejemplo ajustar la frecuencia de conmutación si es posible, usar un variador que ofrezca una capacidad mayor para la distancia de cable o usar filtros de salida como se mencionó anteriormente.

El fenómeno de onda reflejada es más latente en cables apantallados pudiéndose reducir la capacidad de distancia máxima del cable por lo general en un 50% comparada con la distancia del cable sin apantallamiento.

**Módulo de Frenado.** Los variadores pueden requerir un módulo de frenado en caso de contar con cargas regenerativas tales como elevadores, rodillos y ventiladores entre otros. Las cargas son regenerativas cuando después de cortarle el suministro de energía al motor la carga no asegura una rápida detención por sí misma. Para el caso de un elevador este puede incluso presentar una aceleración al ser desenergizado el motor. La regeneración también puede estar presente al reducir la velocidad en el motor.

Si no es importante el tiempo de detención de la carga se puede optar por prescindir del módulo de frenado y desenergizar la salida del variador. Este proceso es conocido como parada por inercia. Hay que tener en cuenta que hay cargas que pueden durar varios minutos en detenerse y puede ser necesario realizar un nuevo arranque antes de que la carga se halla detenido. Si no se usa módulo de frenado para este caso el variador debe contar con una opción llamada enganche en vuelo que detecta la velocidad del motor y envía la frecuencia adecuada para retomar su control.

Otra forma de prescindir del módulo de frenado es usar una rampa de desaceleración bastante larga que logre detener el motor en un tiempo más corto que la parada por inercia. El tiempo de esta rampa depende de la sobre tensión en el bus DC que genera la carga. Este nivel de tensión debe estar dentro del rango de tolerancia del variador o podrá averiar los condensadores del bus DC.

El motor con freno incluido o moto freno también es una solución para la detención rápida del motor teniendo el inconveniente de que en la mayoría de los casos está diseñado para realizar un frenado brusco que no siempre es aceptable por el proceso que se está manejando.

Existen configuraciones donde hay múltiples variadores de frecuencia conectados en paralelo por el bus DC y unos trabajan con la energía de regeneración de otros. Para este caso existe una resistencia de frenado común a todos que trabaja cuando ningún variador demanda energía y el nivel de tensión en el bus DC común llega a un valor determinado.

Para variadores de potencias altas puede ser más rentable utilizar una configuración AFE si la cantidad de energía inyectada a la red genera un retorno de inversión apreciable.

**Entradas y Salidas de Control.** Los variadores cuentan con un número determinado de entradas digitales, salidas digitales, entradas analógicas, salidas analógicas, salidas de relé, entradas de pulsos, salidas de pulsos y entradas más especializadas como entradas para encoder, entradas para termistor, etcétera. Un solo borne de control puede llegar a cumplir con varias de estas funciones y en la programación del variador se le asigna que tipo de función tendrá.

Cuando el número de entradas salidas no es suficiente para la aplicación que se quiere diseñar, es necesario optar por un variador de gama más alta que por lo general cuenta con más entradas salidas o si es posible añadir una tarjeta de extensión con entradas y salidas del tipo requerido. Si el proceso es tan complejo que aun así no son suficientes las entradas o las salidas sería necesario recurrir a un relé programable o a un PLC.

Si una aplicación debe trabajar en lazo cerrado lo ideal es que el variador reciba la señal de realimentación y regule la velocidad del motor utilizando su controlador PID. Sin embargo, en ocasiones es necesario que el lazo cerrado lo haga un controlador externo y el variador trabaje

como esclavo graduando su frecuencia en base a una señal de entrada enviada por este controlador.

**Buses de Campo.** Los variadores de frecuencia cuentan también con conexión a buses de campo como Modbus, Profibus y Ethernet/IP entre otros para conectarse con otros dispositivos como PLCs, Pantallas HMI, computadores, etcétera. Estos buses de campo pueden venir por defecto con el variador o puede ser necesario instalar una tarjeta adicional. Pueden existir buses de campo especializados para un tipo de aplicación específica y solo funcionarían con variadores especializados para esa aplicación. Por ejemplo, el bus de campo BACnet está diseñado para funcionar en edificios y es común en los variadores para aplicaciones HVAC.

Una gran ventaja de la conexión por bus de campo es la reducción del número de cables que se debe utilizar en comparación con la conexión punto a punto, pero una gran desventaja es la necesidad de contar con mano de obra técnica calificada en el trabajo con buses de campo.

**Hardware Embebido Adicional.** Además de las tarjetas adicionales de entradas salidas o de buses de campo puede ser necesario contar con un hardware embebido adicional en el variador para una aplicación específica como puede ser un control de alternación y adición de bombas, un control de sincronismo, un control de posicionamiento, la conexión de un encoder o resolver, etcétera. Este tipo de hardware se adiciona al variador y al ser embebido evita en gran medida el uso de elementos de control externos como PLCs con módulos especializados con todo lo adicional que estos necesitan para funcionar.

Este hardware embebido realiza su tarea de una forma bastante eficiente y reduce de forma considerable la complejidad del sistema.

**Lógica Programada y Setup.** En algunos casos el variador de frecuencia debe trabajar en base al cumplimiento de condiciones, comparaciones, temporizaciones, etcétera. Para ello

puede ser necesario que cuente con un lenguaje de lógica programada que evite tener que recurrir a un controlador externo. Los variadores que cuentan con lógica programada tienen un determinado lenguaje según sea su fabricante. Puede ser Ladder, lista de instrucciones o funcionar con lógica secuencial. Esta programación suele hacerse desde un PC aunque generalmente también es posible realizarla desde el display del variador.

Existen aplicaciones en las que un motor realiza una tarea mientras que otro de una potencia igual o cercana que realiza otra tarea está desactivado. Para estos casos el variador cuenta con varios setups y en cada uno se puede guardar una programación distinta lo que permitirá que se pueda usar un solo variador para los dos motores utilizando una transferencia a la salida. También se puede requerir un cambio de setup cuando el motor debe tener comportamientos totalmente diferentes en una misma aplicación. El cambio de setup se puede realizar por una señal digital, por bus de campo o por la lógica programada del variador.

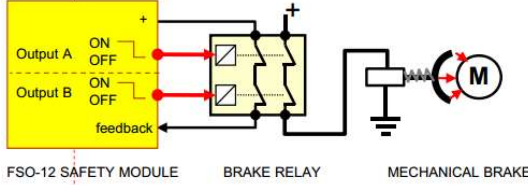
**Safe Torque Off.** Los variadores de frecuencia pueden necesitar una parada segura ya sea para garantizar la seguridad de personas o la seguridad del proceso. La norma IEC-60204-1 define los tipos de parada segura que pueden tener los variadores de frecuencia. Los más importantes se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14

## Principales clases de paradas seguras

Petición de activación	Gráfica	Descripción
STO Safe Torque-Off (Paro muerto)		<p>El motor queda desenergizado y se detiene por inercia. El módulo inversor queda inhabilitado para conmutar</p>
SS1 Safe Stop 1 (Paro por rampa)		<p>El motor desacelera de acuerdo con una rampa establecida. Posteriormente a su detención el módulo inversor queda deshabilitado para conmutar</p>
SLS Safely Limited Speed		<p>Se controla que la velocidad del motor no exceda un límite establecido que al superarse podría provocar un accidente</p>
SMS Safe Maximum Speed		<p>Es una variante de la función de seguridad SLS. Proporciona protección continua contra un motor que</p>



Petición de activación	Gráfica	Descripción
SBC Safe Brake Control		<p>excede un límite de velocidad máximo definido</p> <p>Esta función proporciona una señal de salida segura para controlar un freno mecánico. El uso típico de SBC es cuando existe una parada con la función STO y hay una carga activa que obliga el giro del motor</p>

*Fuente.* ABB. (2016). Seguridad funcional basada en convertidores [Archivo PDF]. p. 4-5.

[https://library.e.abb.com/public/bedb10857e2d4717ae0416893a9dc402/ABB\\_WhitePaper\\_DriveBased\\_ES\\_3AUA0000195481.pdf](https://library.e.abb.com/public/bedb10857e2d4717ae0416893a9dc402/ABB_WhitePaper_DriveBased_ES_3AUA0000195481.pdf)

### ***Selección de Protecciones Eléctricas***

Las protecciones eléctricas son las encargadas de garantizar la fiabilidad, la durabilidad y la seguridad del sistema de variación de velocidad. Los equipos están diseñados para funcionar bajo condiciones ideales que no se cumplen en el mundo real. La función de las protecciones eléctricas es permitir que los equipos funcionen o que por lo menos no sufran averías causadas por las fallas que se presentan en la realidad.

Estas protecciones son diseñadas para varios tipos de fallas, principalmente contra sobrecarga, corto circuito, transitorios de tensión y fallas de suministro. Para solucionar cada tipo de falla pueden existir varios tipos de dispositivos y además pueden existir dispositivos diseñados para solucionar dos tipos de fallas.

El variador de frecuencia cuenta con funciones para proteger al motor contra cortocircuito, sobrecarga o por temperatura y pueden contar con entrada para un sensor de temperatura instalado en el motor. Es fundamental que los datos de placa del motor estén correctamente ingresados en la programación del variador para poder protegerlo de una manera eficiente.

**Protecciones Contra Cortocircuitos.** Un cortocircuito se puede presentar por falla en el variador de frecuencia o por avería en los conductores que lo alimentan. Para este tipo de falla es importante una rápida desconexión que impida la destrucción del equipo, de los conductores o las consecuencias de la liberación de energía que produce el corto.

Para protección contra cortocircuito se utilizan interruptores automáticos y/o fusibles. Los interruptores automáticos pueden ser guardamotors en variadores de frecuencia de talla pequeña, interruptores en caja moldeada en variadores de tallas medianas y grandes e interruptores de aire para los variadores más grandes, los mini interruptores son muy limitados para la protección de variadores de frecuencia debido a su bajo poder de corte y a su bajo nivel de aislamiento para el caso de variadores de más de 400VAC.

En la actualidad tanto guardamotors como interruptores en caja moldeada generalmente cuentan también con protección térmica contra sobrecarga. En caso de que solo cuenten con protección magnética contra cortocircuito es necesario contar también con un dispositivo de protección térmica. La principal norma que rige a los interruptores automáticos es la IEC 947-2.

Los interruptores en caja moldeada con disparo electrónico al igual que los interruptores de aire, tienen una mayor eficiencia y se destacan por tener un mayor número de parámetros de configuración. Su costo es mayor y generalmente son para altos niveles de corriente.

Los fusibles pueden considerarse como el tipo de protección contra cortocircuito más eficiente por su velocidad y alto poder de interrupción, pero tienen el problema de que solo funcionan una vez y se debe contar con repuestos para reemplazarlos cuando se destruyan.

**Protecciones Contra Sobrecarga.** Las protecciones contra sobrecarga generalmente vienen integradas con las de cortocircuito en un interruptor o en un guardamotor. En la actualidad el único dispositivo que tiene únicamente protección contra sobre carga es el relé térmico. Este generalmente está diseñado para acoplarse a un contactor y su aplicación ideal es en arranques directos de motores. El uso del contactor aguas arriba generalmente no es necesario para trabajar con variadores de frecuencia.

El dimensionamiento de la protección térmica de un variador no es igual al de un motor en arranque directo y no está normalizado. La distorsión armónica aumenta la exigencia de las protecciones eléctricas. Generalmente las guías de diseño de los fabricantes cuentan con tablas para selección de protecciones.

**Protecciones contra Transitorios de Tensión.** Los transitorios de tensión son fenómenos causados principalmente por descargas atmosféricas o por operaciones de maniobra de equipos en la red. Su detección solo se puede realizar con equipos de medición como analizadores de red.

Un solo transitorio con suficiente energía puede destruir un variador de frecuencia mientras que la aparición de varios transitorios con poca energía puede acortar notoriamente su vida útil. Los transitorios también son culpables de fallas en los dispositivos de control de los variadores de frecuencia.

Los TVSS (Transient Voltage Surge Suppressors) también llamado DPS (Device Protective Device) son los elementos usados para la protección contra transitorios de tensión. Su

uso en subestaciones es obligatorio según el reglamento de instalaciones eléctricas colombiano. La norma IEC 61643 Contiene definiciones de términos, requisitos generales y procedimientos de prueba para dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias.

Para proteger las líneas de alimentación existen DPSs tipo 1 que se instalan en las subestaciones y son especiales para descargas atmosféricas directas, los DPSs tipo 2 se instalan en tableros de distribución y están hechos para transitorios producidos por operaciones de maniobra y descargas indirectas y por último los DPSs tipo 3 que se instalan antes de los dispositivos finales.

Cada tipo de DPS está diseñado para contrarrestar un transitorio de un nivel de tensión determinado por lo que es necesario que en el recorrido de conductores desde la subestación hasta el dispositivo final se encuentren los tres tipos de DPSs. Para el caso de los variadores de frecuencia es suficiente con un DPS tipo 1 en la subestación y un tipo 2 en el tablero del variador ya que los variadores pueden soportar los transitorios para DPS tipo3. Si no se confía en la protección contra DPS existente en la instalación eléctrica, se puede usar un DPS tipo 1+2 en el tablero del variador.

Para el correcto funcionamiento de un DPS es de vital importancia contar con un buen sistema de puesta a tierra y de protección contra rayos.

Los cables de control provenientes del exterior del tablero también deben ser protegidos por DPSs. Para estos casos existen DPSs para señales digitales, para señales analógicas, para buses de campo, etcétera.

**Protecciones Contra Fallas de Suministro.** El suministro eléctrico puede presentar fallas como desbalanceo, pérdida de fase, inversión de fase (que no afecta en nada al variador), sobre tensiones y bajas tensiones prolongadas, corte de energía, etcétera. En la norma ICONTEC

5001 están definidas las consideraciones para medir la calidad de la potencia eléctrica. Existen distintos tipos de protecciones contra este tipo de fallas.

La más básica es un monitor de red que cuenta con un contacto que cambia de estado cuando encuentra alguna irregularidad. Este contacto puede enviar una señal al variador para que deje de trabajar o desactivar un contactor que permite el paso de energía hacia el variador. El variador puede contar con algunas funciones que le permiten detectar algunas fallas de suministro y detenerse por sí mismo.

Los analizadores de red son medidores que permiten el monitoreo en tiempo real de los parámetros de la red y pueden tener la capacidad de almacenar datos y comunicarse con otros equipos. Estos también podrían servir directa o indirectamente como protecciones contra fallas de suministro de red.

Los reguladores de tensión pueden realizar algunas mejoras en el suministro de la red para una correcta operación del sistema. Sin embargo, pueden llegar a bajar la eficiencia del sistema según su diseño debido a la energía que consumen.

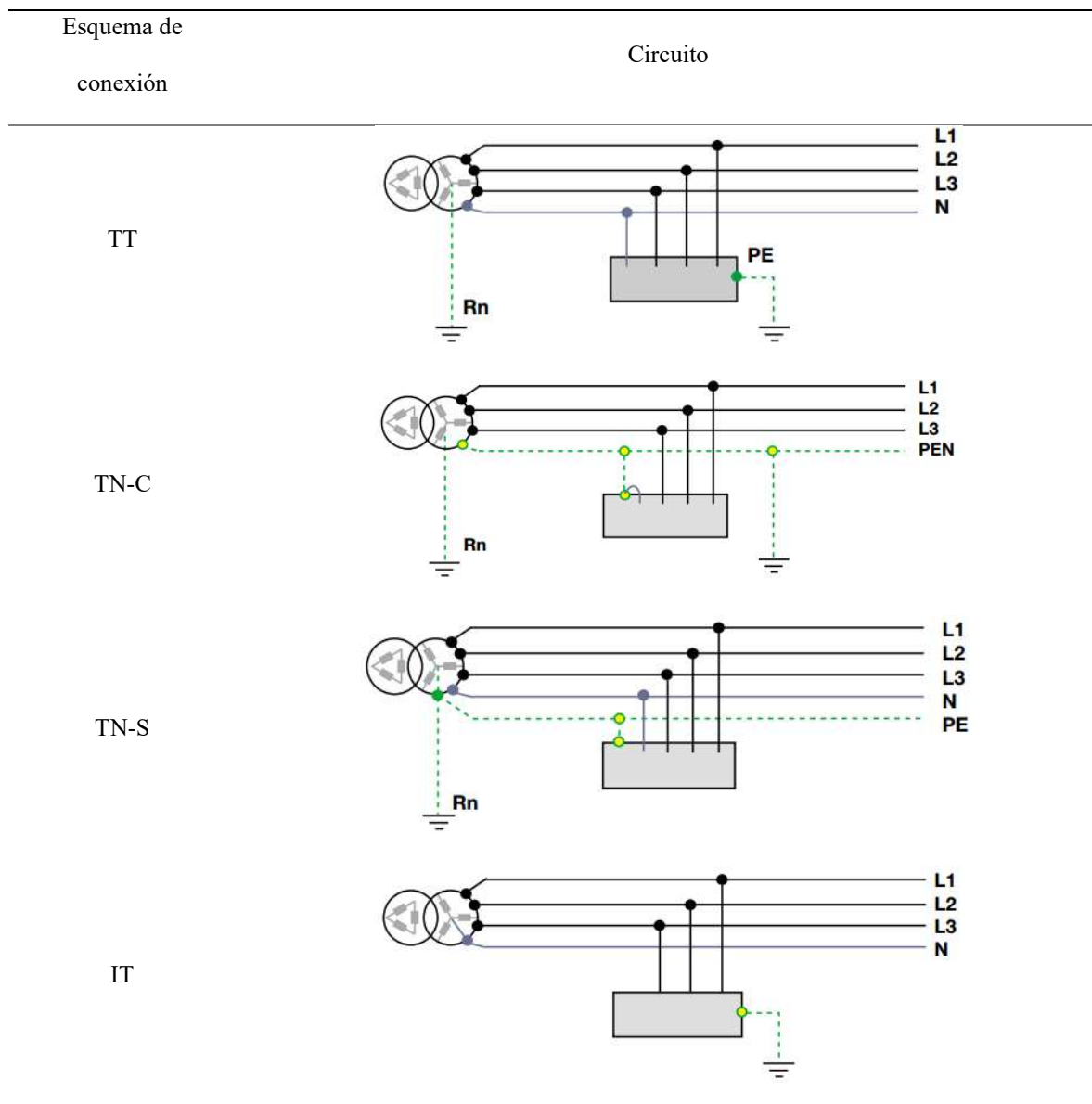
Por último, están las UPS que suministran energía de calidad y pueden mantener el suministro después de un corte de energía durante un tiempo mientras entra un grupo electrógeno de respaldo. Si el suministro de energía a la UPS es de mala calidad puede ser necesario usar un regulador aguas arriba de la UPS según el rango de fallas en el suministro que esta pueda soportar. Las UPSs son muy importantes en casos donde detener la operación puede dañar el producto que se está fabricando.

**Puesta a tierra, protecciones contra falla a tierra y protecciones contra descargas atmosféricas.** Los regímenes de conexión a tierra (RTC), también llamados “regímenes de neutro”, tienen una clasificación acordada internacionalmente para sistemas eléctricos de baja

tensión, los cuales se consideran equivalentes en cuanto a seguridad de personas frente a contactos indirectos, cada uno tiene sus ventajas. Los más usados son TN y TT, cuyo código de letras es aceptado en las normas internacionales (Ministerio de Minas y Energía, 2013. p. 164).

Tabla 15

Esquemas de conexión a tierra



Fuente. Schneider Electric. (2003. 820p.). Manual teórico-práctico de Instalaciones en Baja tensión Volumen 1

[Archivo PDF], p F76-F80. Barcelona: Schneider Electric España, S.A. [https://download.schneider-](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Specification+guide&p_File_Name=600009K03-mtp-vol1.pdf&p_Doc_Ref=600009K03&_ga=2.191935662.529800813.1666032643-202378125.1663150407)

electric.com/files?p\_enDocType=Specification+guide&p\_File\_Name=600009K03-mtp-

vol1.pdf&p\_Doc\_Ref=600009K03&\_ga=2.191935662.529800813.1666032643-202378125.1663150407

El reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) prohíbe expresamente el régimen TN-C principalmente por utilizar el mismo conductor para tierra y para neutro (PEN). Sin embargo, los variadores de frecuencia no requieren el uso de neutro por lo que es habitual encontrar este régimen con un conductor exclusivamente de tierra (PE). El régimen TN-S es el más común en las instalaciones eléctricas de los variadores de frecuencia lógicamente obviando el cable de neutro que no tiene uso.

La correcta instalación de la puesta a tierra va de la mano con el correcto funcionamiento del sistema de protección contra transitorios (DPS). Incluso para su correcta selección se debe tener en cuenta el régimen de conexión a tierra en el que se va a utilizar.

Para el caso de las descargas atmosféricas además de la puesta a tierra es de vital importancia un adecuado sistema de pararrayos.

La evaluación del nivel de riesgo por rayos, debe considerar la posibilidad de pérdidas de vidas humanas, pérdida del suministro de energía y otros servicios esenciales, pérdida o graves daños de bienes, pérdida cultural, así como los parámetros del rayo para la zona tropical, donde está ubicada Colombia y las medidas de protección que mitiguen el riesgo; por tanto, debe basarse en procedimientos establecidos en normas técnicas internacionales como la IEC 62305-2, de reconocimiento internacional o la NTC 4552-2 (Ministerio de Minas y Energía, 2013. p. 74).

Las fallas a tierra pueden ser una falla recurrente en los variadores de frecuencia. A pesar de que estos cuentan con protección básica contra falla a tierra, pueden existir escenarios en los que su desempeño no sea óptimo debido a parámetros como la capacitancia del sistema, la corriente de carga, el desequilibrio de tensión y las limitaciones de los transformadores de corriente entre otros (Littelfuse, Inc., 2016. p. 3).



Si las condiciones de funcionamiento del variador de frecuencia hacen que su protección interna contra falla a tierra sea deficiente puede ser necesario instalar un relé de falla a tierra externo. El uso de relés de falla a tierra es bastante común en variadores de frecuencia de media tensión.

### ***Conductores Eléctricos***

La instalación de los variadores de CA tiene requisitos específicos en lo que respecta a los cables. Se debe considerar una variedad de criterios al seleccionar los conductores o cables para una aplicación de variador como el entorno, las necesidades mecánicas, las características eléctricas y los aspectos de seguridad (Allen Bradley, 2010. p. 9).

Es muy importante seguir las indicaciones de los manuales de los variadores de frecuencia para seleccionar e instalar adecuadamente los conductores ya sean de potencia o de control.

**Conductores de Potencia.** Los conductores de potencia pueden ser de alimentación, de motor, de frenado, y de interconexión de bus DC.

Los conductores de alimentación por lo general pueden ser cables convencionales de uso industrial, aunque en casos en que el nivel de emisión RFI debe ser mínimo, se deben utilizar cables con apantallamiento. Para el dimensionamiento de estos cables se debe tener en cuenta la distorsión armónica del variador de frecuencia ya que esta produce un incremento de temperatura en el conductor. Una forma práctica de dimensionar el cable del variador es basarse en la corriente del interruptor automático sugerido por el fabricante para instalar aguas arriba del variador.

Los cables de salida al presentar una forma de onda de tensión del tipo PWM, se constituyen en una fuente de emisión de ruido RFI, además por el fenómeno de onda reflejada se

pueden presentar picos de tensión que pueden deteriorar el aislamiento de los conductores. Por lo tanto, en muchas ocasiones es recomendable usar cable apantallado para variador de frecuencia como el de la Figura 61.

**Figura 61**

*Cable de potencia para variador de frecuencia*



*Fuente.* Belden. (2020). Variable frequency drive (VFD) cable solutions. p. 1. [Archivo PDF]. Belden Inc.

<https://www.belden.com/dfsmedia/f1e38517e0cd4caa8b1acb6619890f5e/7443-source/variable-frequency-drive-cable-belden-2019-03>

Este tipo de cable cuenta con apantallamiento y un sistema de tierras simétrico que reduce notablemente la emisión de ruido RFI.

Un parámetro importante para tener en cuenta en el apantallamiento es su rendimiento que viene dado por su impedancia de transferencia  $Z_T$  que relaciona la corriente en la superficie del blindaje con la tensión que cae en el conductor que es cubierto por este (DANFOSS, 2014. p. 127).

Una desventaja que tiene el cable apantallado de motor es que reduce la distancia de máxima que se puede usar porque el fenómeno de onda reflejada se presenta en un trayecto más corto en comparación con el cable tradicional por lo que puede llegar a ser más necesario el uso de un filtro seno o un filtro  $dv/dt$  si el tramo de cable de motor tiene una distancia considerable. Las guías de diseño de los variadores de frecuencia cuentan con información sobre las distancias

máximas aceptables de cables según su tipo y cuando es necesaria la utilización de filtros de salida.

Los cables de módulo de frenado al presentar una modulación PWM también constituyen una fuente de ruido RFI por lo que puede ser necesario también que estos tengan apantallamiento.

Los cables de interconexión DC, por lo general pueden ser de tipo convencional ya que presentan un bajo nivel de emisión de ruido RFI. En estos y en los de módulo de frenado se debe tener en cuenta que un aislamiento de 600 V no es aceptable para un bus DC de variadores que trabajen a 380-480 VAC siendo necesario el uso de cables con aislamiento de 1000 V.

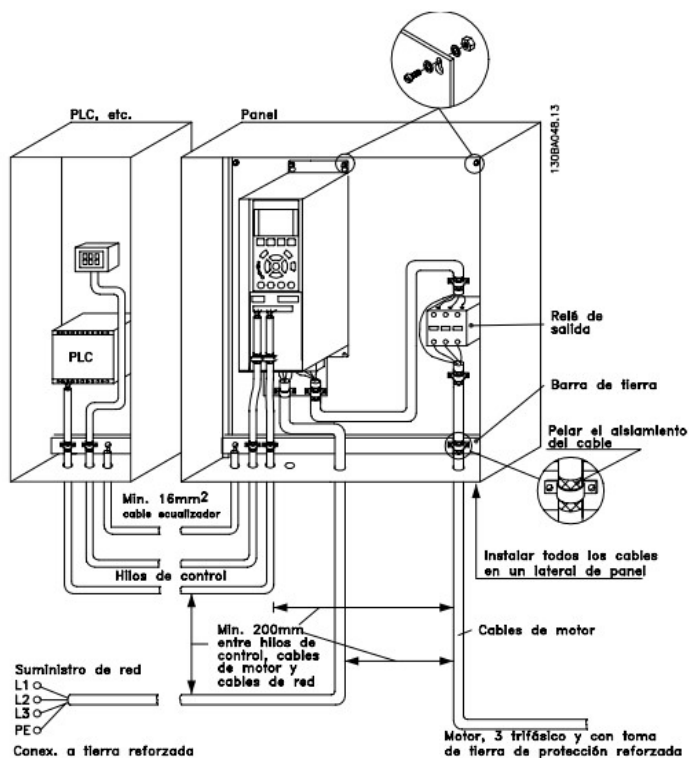
**Conductores de Control.** Los conductores de control pueden ser de entradas - salidas digitales, de entradas – salidas analógicas, de bus de campo, o de señales especiales como encoder o señales de pulsos. Siempre deben estar a una distancia considerable de los cables de potencia. Esta distancia generalmente la define el fabricante del variador. En caso de que sea inevitable que pasen cerca a los cables de potencia el cruce debe ser de forma perpendicular.

Los cables de entradas – salidas digitales pueden ser de tipo convencional sí se mantienen lejos de los cables de potencia. De lo contrario es recomendable el uso de cables apantallados para la transmisión de señales digitales de control como comandos de arranque y paro (Allen Bradley, 2010. p. 19).

En la Figura 62 se observa una forma correcta de instalar el cableado de control y de potencia de un variador de frecuencia manteniendo las distancias y los ángulos adecuados en los conductores y aterrizando de forma correcta los apantallamientos tanto de los cables de potencia como de los de control. En el apéndice L se pueden observar distintas maneras de aterrizar el apantallamiento de los cables.

Figura 62

Instalación eléctrica correcta en cuanto a EMC de un convertidor de frecuencia en el armario



Fuente. Danfoss. (2017. 252p). Guía de diseño VLT Automation Drive FC 302 315-1200 kw. p. 191. [Archivo PDF]. <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG34S305.pdf>

Los cables de señales analógicas deben ser blindados en todos los casos. La Tabla 16 muestra el tipo de cable idóneo para señales analógicas y de encoder.

**Tabla 16***Conductores recomendados para señales analógicas y de encoder*

Tipo de señal / dónde se utiliza	Tipo(s) de conductores	Descripción
E/S analógicas estándar		18AWG, par trenzado, 100% blindaje con cable de tierra
Potenciómetro remoto		18AWG, 3 conductores, blindado
E/S de encoder/ impulsos	Combinado:	24AWG, blindaje individual
Menos de 30.5 m (100 pies)		
E/S de encoder/ impulsos	Señal:	24AWG, blindaje individual
	Alimentación eléctrica:	18AWG
30.5 m (100 pies) a 152.4 m (500 pies)	Combinado:	21AWG o 20 AWG
E/S de encoder/ impulsos	Señal:	24AWG, blindaje individual
	Alimentación eléctrica:	18AWG
152.4 m (500 pies) a 259.1 m (850 pies)	Combinado:	18AWG, par con blindaje individual

*Fuente.* Allen-Bradley. (2010. 120p.). Pautas de cableado y conexión a tierra para variadores de CA con modulación de impulsos en anchura (PWM) [Archivo PDF].

[https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/drives-in001\\_-es-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/drives-in001_-es-p.pdf)

La ecuación (37) define la impedancia de transferencia. En la Figura 63 aparecen distintos tipos de apantallamientos para cable de motor y su impedancia de transferencia según la frecuencia.

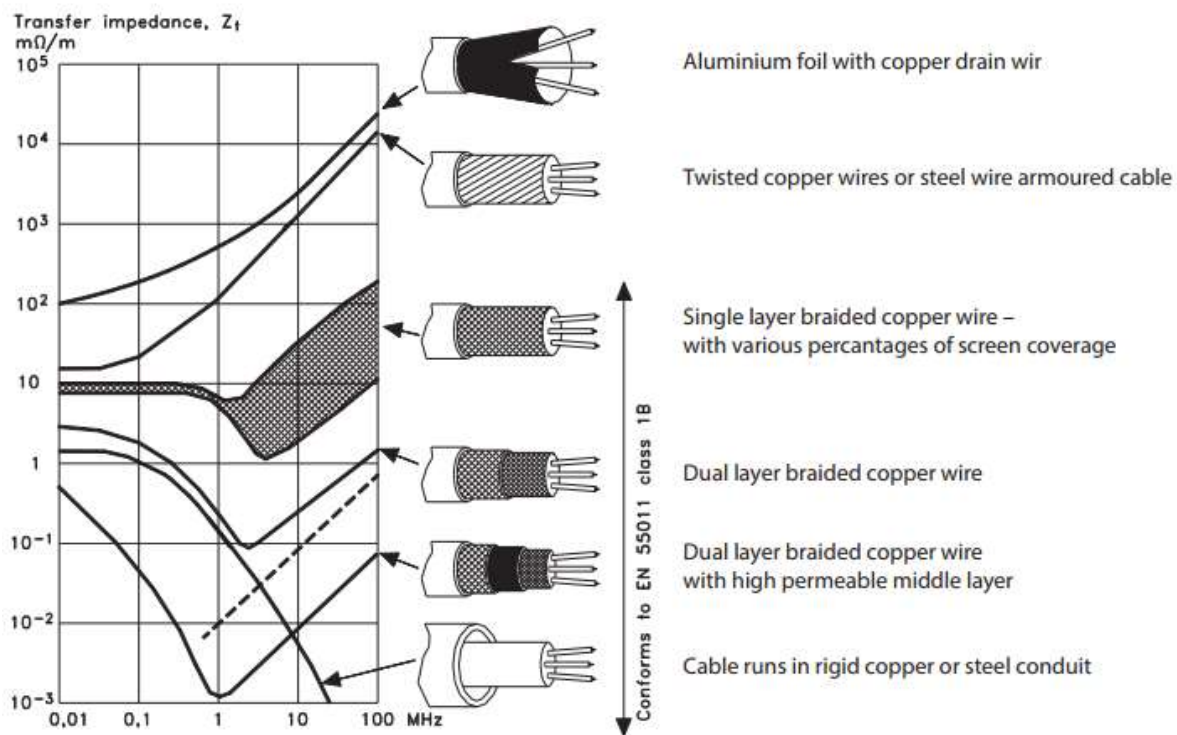
$$Z_T = \frac{v_2}{i_1 l} \quad (37)$$

Donde  $v_2$  es la tensión que cae en el conductor en una distancia  $l$  e  $i_1$  es la corriente que circula por el apantallamiento de este conductor.

Vale la pena aclarar que la canalización por tubería metálica puede cumplir la función de apantallamiento por lo que un cable sin apantallamiento tendría una baja emisión de ruido RFI si se canaliza de esta forma. Sin embargo, la tubería debería llegar directamente desde el variador hasta el motor sin dejar tramos descubiertos de cable ya que estos serían fuentes de emisión de ruido. Tomando la tubería como apantallamiento también se puede tener una resistencia de transferencia como lo muestra el tipo de apantallamiento ubicado en la parte inferior de la Figura 63.

Figura 63

Tipos de apantallamiento para cables de motor



Fuente. DANFOSS. (2014. 180p). Facts Worth Knowing about Frequency Converters. p. 127. [Archivo PDF].

Ulsnaes. <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/>

## **Ejemplos y Aplicaciones de Sistemas de Variación de Velocidad por Frecuencia**

La combinación de variadores de frecuencia en conjunto con motores de inducción trifásicos como se ha mencionado antes, no siempre se usa necesariamente por la necesidad de lograr una variación de velocidad, sino que muchas veces se utiliza buscando aprovechar alguna de sus ventajas como el ahorro de energía, un bajo pico de arranque o controlar la detención del motor entre otros.

En el presente capítulo se dan algunos ejemplos de aplicaciones con variadores de frecuencia y se mencionan las principales cosas que se deben tener en cuenta para lograr el correcto funcionamiento de la aplicación.

### **Sustitución de Motor DC por Motor de Inducción**

Con el auge de los variadores de frecuencia se ha logrado que los motores de inducción desplacen a los motores de corriente continua en múltiples aplicaciones llevando a los últimos a ser cada vez menos comunes en la industria. Esta migración a motores de inducción se debe a sus costos más bajos de adquisición y de mantenimiento.

Es de notar que para lograr la variación de velocidad de un motor de corriente continua es necesario un drive al igual que para el motor de inducción. Por lo general el conjunto VFD + motor de inducción resulta más económico que el conjunto de drive + motor de corriente continua para una misma aplicación. Esto sumado con las ventajas ya mencionadas, hace que los motores de inducción sean los más usados en la actualidad tanto en aplicaciones de velocidad fija como en aplicaciones de velocidad variable.

Es importante tener en cuenta que las diferencias existentes en el comportamiento de los distintos tipos de motores de corriente continua son bastante marcadas. Sin embargo, la facilidad para variar su velocidad es una de las características primordiales con la que cuentan estos



motores y es por esto por lo que se utilizaban en aplicaciones que requerían variación de velocidad ante la ausencia que había de drives para controlar los motores de inducción.

Otras características importantes de los motores de corriente continua son su par de arranque bastante elevado en el caso de los motores tipo serie, su capacidad de acelerar rápidamente o su facilidad para mantener una velocidad constante en el caso de los motores tipo shunt.

En muchos casos la exigencia de la aplicación puede requerir que el motor de corriente continua solo pueda ser reemplazado por un motor de inducción sobre dimensionado, un motor de inducción inverter duty de baja inercia o motores síncronos de imán permanente que pueden utilizarse con varios modelos de variadores de frecuencia.

Para realizar la sustitución de un motor de corriente continua por uno de inducción primero se deben identificar las características de la aplicación que han llevado a la implementación de un motor de corriente continua. En la Tabla 17 se encuentran los datos de placas más relevantes de un motor de corriente continua que se desea reemplazar por uno de inducción.

**Tabla 17***Características de motor CC a ser reemplazado*

HP	0.75	DUTY	CONT
RPM	1750	ENCL	TEFC
FRAME	56C	ARM A	3.9
ARM V	180	FLD A	.3/.6
FLD V	200/100	AMB.	40
INSUL	F	FIELD TYPE	SHUNT

*Fuente.* Adaptado de: Baldor Reliance. Paquete de información de producto CD3476 - MOTOR 3/4 HP 1750 RPM NEMA 56C. 2018. 11p.

En la información de la placa se puede encontrar que es un motor tipo shunt lo cual implica que la aplicación requiere mantener una velocidad muy estable. En la Figura M1 se observan las curvas de desempeño del motor de corriente continua.

En la curva de RPM se observa que existe una variación de la velocidad con respecto a la carga aun mayor que la variación que tendría un motor de cuatro polos variando su carga y en principio se podría pensar que esto contradice una de las principales características del motor DC tipo shunt que es su velocidad constante. Lo que sucede es que su velocidad tiende a ser constante con respecto a su tensión de armadura mas no con respecto a la carga.

Con la información recopilada del motor DC se puede seleccionar un motor de inducción que pueda tener un desempeño similar. En el selector de motores del fabricante Baldor Reliance (perteneciente a ABB) se puede seleccionar un motor según las características deseadas como lo muestra la Figura 64.

Los principales criterios para el filtrado de búsqueda fueron la potencia nominal, el frame del motor y que el motor de inducción tuviera una velocidad nominal cercana a la del motor de

corriente continua. Aplicado el filtro se encontraron 35 opciones por lo que se procedió manualmente a descartar motores que no tuvieran brida F3 ni ventilación TEFC. Posteriormente se eliminaron motores para aplicaciones especiales, motores con freno y motores que no tuvieran la caja de conexiones arriba. El número de motores que cumplían las condiciones siguió siendo elevado por lo que se tuvo el criterio de seleccionar motores con la velocidad del eje más elevada (1750RPM).

**Figura 64**

*Aplicación on-line de Baldor-Reliance para selección de motores*

	CUHM3542	VEUHM3542
Bearing Grease Type	POLYREX EM (-20F +300F)	POLYREX EM (-20F +300F)
Blower	None	None
Current	2.5 A @ 208 V	2.5 A @ 208 V
	2.4 A @ 230 V	2.2 A @ 230 V
	1.2 A @ 460 V	1.1 A @ 460 V
Design Code	B	B
Drip Cover	No Drip Cover	No Drip Cover
Duty Rating	CONT	CONT
Efficiency @ 100% Load	77.0%	84.0%
Electrically Isolated Bearing	Not Electrically Isolated	Not Electrically Isolated
Feedback Device	No feedback	No feedback
Front Face Code	Standard	Standard
Front Shaft Indicator	None	None
Heater Indicator	No heater	No heater
High Voltage Full Load Amps	1.2 A	1.1 A

*Fuente.* BALDOR-RELIANCE. Baldor AC Motors. Baldor a member of the ABB group. [Online] 23 10, 2018.

<https://www.baldor.com/catalog#category=2>.

Finalmente se encuentran dos motores de características similares y se selecciona el modelo VEUHM3542 por su mayor eficiencia a pesar de que no cuenta con base como el motor de corriente continua que se desea reemplazar. Las dimensiones de la brida y el eje son exactamente las mismas facilitando la instalación del nuevo motor. En la Tabla 18 se observan

las características del motor de inducción seleccionado y como coincide en su potencia, velocidad, frame, ciclo de trabajo, y modo de refrigeración.

**Tabla 18**

*Características de motor de inducción seleccionado*

HP	0.75	DUTY	CONT
RPM	1750	ENCL	TEFC
FRAME	56C	AMP	2.5-2.2/460
VOLTS	208-230/460	PF	73
SER. F	1.15	AMB.	40
INSUL	F	DESIGN CODE	B

*Fuente.* Baldor Reliance. Paquete de información de producto VEUHM3542 .75HP, 1750RPM, 3PH, 60HZ, 56C, 3516M, TEFC,F3

Para la precisión de la velocidad en la aplicación puede ser necesario el uso de un encoder si este también era necesario usando el motor de corriente continua. En la Figura M2 se pueden observar las curvas de desempeño del motor de inducción.

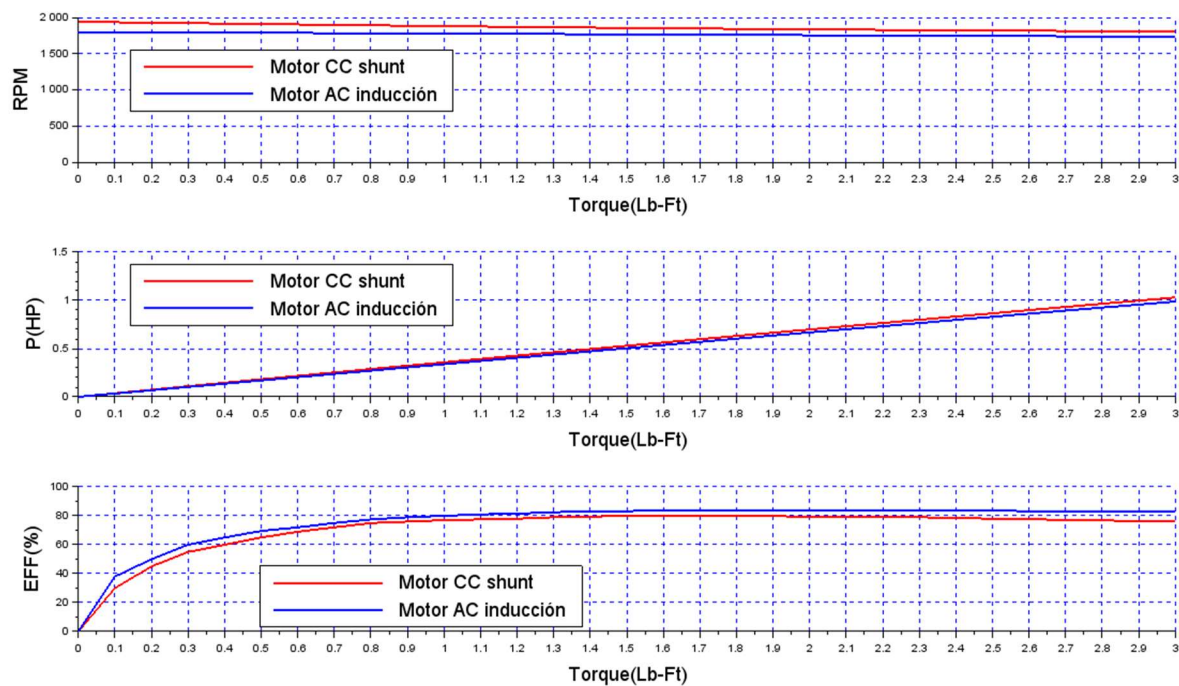
En la Figura 65 se recogieron algunos datos de las gráficas del apéndice M para realizar una comparación del comportamiento de los dos motores en condiciones nominales de alimentación con respecto al torque demandado por la carga.

Se puede encontrar que el motor de corriente continua siempre tiene un valor superior de velocidad al que está especificado como velocidad nominal en su placa de datos. Cuando alcanza su torque nominal (2.15 Lb-Ft según la gráfica de su paquete de información) su velocidad es cercana a 1833RPM y no a 1750RPM como sería de esperar.

Por su parte el motor de inducción según su placa de datos tiene una velocidad nominal de 1750 RPM y una potencia de 0.75HP por lo que se esperaría un torque de 2.25 Lb-Ft.

Figura 65

Comparación de curvas de motores DC shunt y de inducción de 0.75HP



Fuente. Autoría propia

En la Figura 65 se puede ver una leve superioridad en la velocidad y la potencia del motor de corriente continua, mientras que el motor de inducción presenta una eficiencia superior. Al ser mínimas las diferencias de torque y velocidad de los dos motores es bastante posible que el motor de inducción pueda reemplazar satisfactoriamente al motor de corriente continua. En caso de no ser así sería necesario emplear un motor de inducción de 1HP que también se fabrica con el frame 56C.

Vale la pena aclarar que con el uso de variador de frecuencia el motor de inducción no podrá superar su torque nominal de manera continua ya que en este caso el factor de servicio sería de 1.0 y si se sobrepasa su velocidad nominal el torque empezará a caer de forma cuadrática con respecto a la velocidad.

## **Sistemas de Bombeo de Agua a Presión Constante**

Las aplicaciones de bombeo de agua a presión constante son las que más se encuentran presentes en entornos residenciales, comerciales e industriales. En la actualidad el uso de variadores de frecuencia en sistemas de bombeo de presión constante experimenta un gran auge debido al ahorro de energía y rápido retorno de inversión que se consigue al utilizarlos.

### ***Configuraciones de Bombas***

Existen múltiples configuraciones de bombas según las necesidades del sistema. Entre las configuraciones más habituales se encuentran los sistemas de una sola bomba, sistemas alternos, sistemas alerno-aditivos, y sistemas de bomba(s) con bomba auxiliar.

En la Figura 66 se pueden ver dos sistemas alerno-aditivos. El sistema de un solo variador y tres arrancadores suaves es idóneo para adiciones ocasionales de bombas o para sistemas exclusivamente alternos. Para que entre una bomba activada por arrancador suave el variador deberá trabajar a la misma frecuencia de la red para tener la misma presión de esta bomba o cada bomba deberá tener una tubería independiente. En este sistema todas las bombas funcionan preferentemente con el variador de frecuencia y solo utilizan los arrancadores suaves cuando se necesita adicionar bombas. El variador también es el encargado de realizar la activación de los arrancadores suaves en caso de que exista la necesidad de adicionar bombas. Los arrancadores suaves pueden ser reemplazados por arranques directos para bombas de tamaños pequeños, pero se debe evaluar el impacto del golpe de ariete en la tubería y el pico de corriente en el arranque.

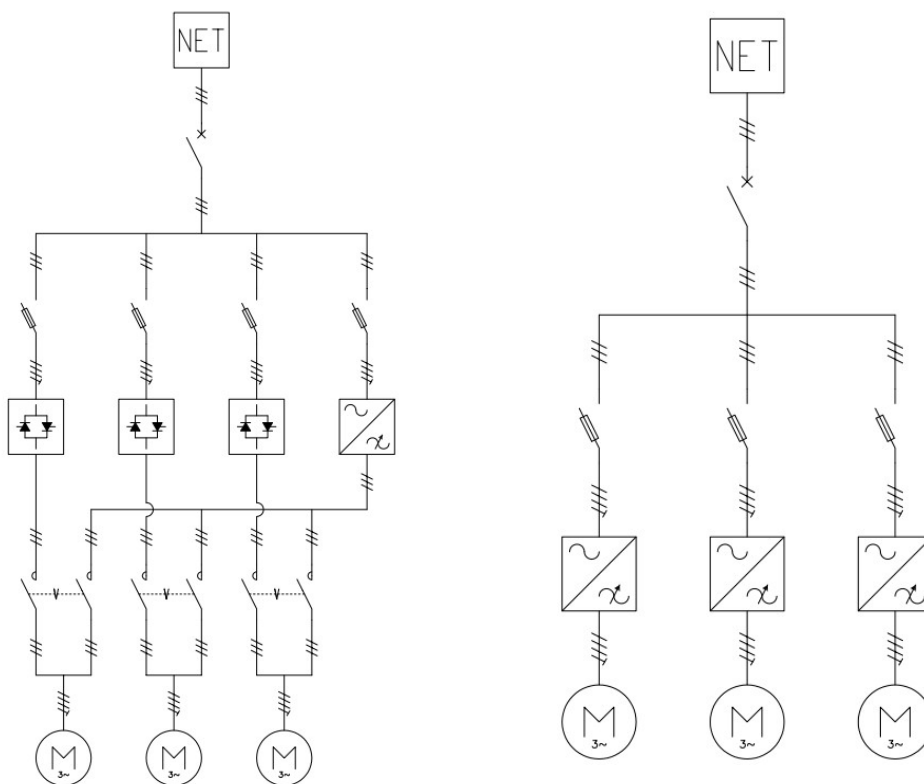
El sistema de tres variadores de la Figura 66 es el más idóneo para sistemas que requieren una adición frecuente de bombas. La señal de realimentación llega a un variador maestro que

controla el arranque y velocidad de los demás variadores y de sí mismo. Si hay múltiples variadores en marcha estos trabajan a la misma velocidad.

Los sistemas de bombeo por lo general cuentan con un hidroflew que es un tanque metálico que en su interior cuenta con una membrana que se expande cuando la presión del sistema sube debido a la bomba y después de apagada la bomba ayuda a mantener la presión mientras la membrana vuelve a su posición natural. Esto permite que las bombas no se activen durante lapsos cortos. El hidroflew también tiene utilidad en sistemas de bombeo con variación de velocidad ya que suaviza los cambios bruscos de presión en el sistema.

**Figura 66**

*Sistemas alterno-aditivos de tres bombas*



*Fuente. Autoría propia*

### *Ahorro de Energía*

El ahorro de energía eléctrica que se presenta en sistemas de bombeo por variador de frecuencia con respecto a otros sistemas de bombeo es sustancial sin embargo se debe tener en cuenta que la mayor pérdida de energía en un sistema de bombeo por lo general se presenta en la bomba que en la mayoría de los casos presenta una eficiencia menor que el motor de inducción e incluso que el conjunto variador-motor.

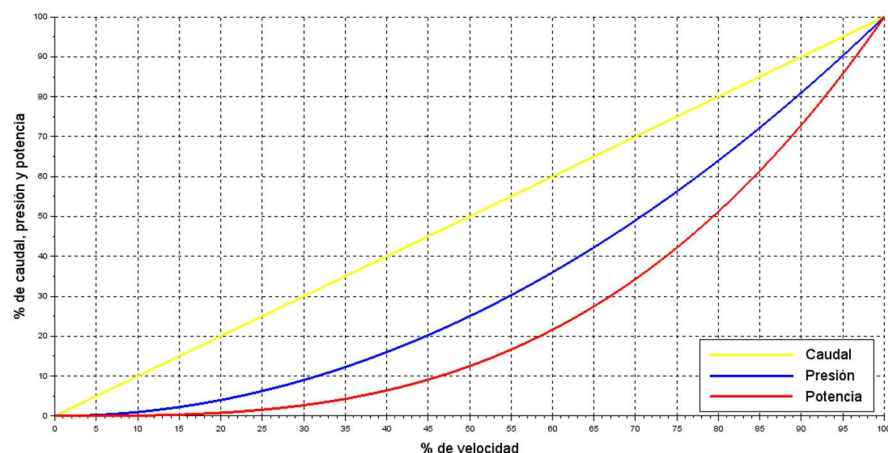
También se debe tener en cuenta que el motor conectado a la red presenta su máxima eficiencia en condiciones nominales de tensión, corriente y frecuencia. Entre menor sea la carga del motor conectado a la red más baja será su eficiencia mientras que en el caso del variador de frecuencia se pueden programar opciones de ahorro de energía que reducen la tensión aplicada al motor con baja carga incluso a velocidad nominal pudiéndose alcanzar una eficiencia mayor a la del motor conectado a la red con baja carga.

Aunque el variador de frecuencia tiene menor eficiencia que un arranque directo o un arrancador suave el hecho de que pueda variar la velocidad de la bomba lo compensa con creces ya que disminuye drásticamente la energía necesaria para mantener un nivel de presión constante. En la Figura 67 se encuentran las curvas de caudal, presión y potencia (en el fluido) de una bomba centrífuga con respecto a la velocidad del impeler. El caudal presenta un incremento lineal, la presión presenta un incremento cuadrático y la potencia presenta un incremento cúbico.



**Figura 67**

*Curvas de una bomba centrífuga*



*Fuente.* Autoría propia

En la mayoría de los sistemas de bombeo de presión constante la demanda de agua es variable lo que produce la necesidad utilizar válvulas estranguladoras aguas abajo de la bomba, utilizar un sistema de recirculación, prender y apagar las bombas, manejar varias bombas en paralelo o utilizar un sistema de velocidad variable (que también puede funcionar con varias bombas en paralelo).

Las opciones de la válvula estranguladora aguas abajo y la recirculación presentan una bajísima eficiencia energética entre menor sea el caudal requerido. Solo pueden presentar una eficiencia energética aceptable si el caudal solicitado por la aplicación es muy cercano al del punto de trabajo óptimo de la bomba lo que da como resultado en el primer caso una válvula aguas abajo abierta casi un 100% y en el segundo caso un caudal de recirculación cercano al 0% del caudal total.

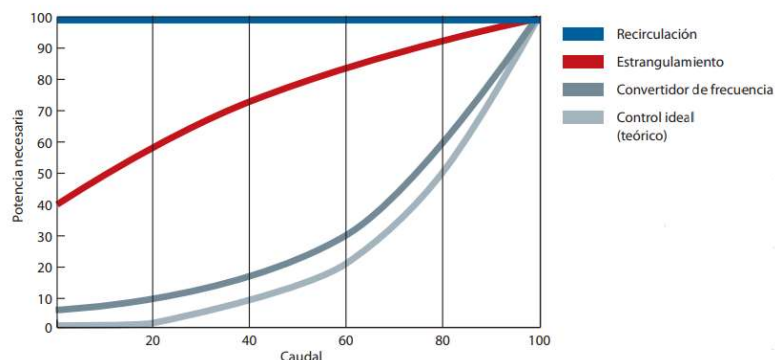
La opción de la válvula estranguladora aguas abajo además presenta el problema de que desplaza la bomba de su punto óptimo de trabajo a velocidad nominal y produce una elevación de la presión a la salida de la bomba.

Por su parte el sistema de recirculación mantiene a la bomba en su punto de trabajo óptimo, pero gasta la misma cantidad de energía sin importar la demanda del sistema ya que trabaja a caudal constante. El caudal producido por la bomba se divide en el que va a ser recirculado y el que es demandado por la aplicación. La regulación de los caudales la efectúa una válvula proporcional realimentada por la presión del sistema.

En la Figura 68 se observan los valores de eficiencia para distintos métodos de regulación de presión.

**Figura 68**

*Comparativa de métodos de regulación de presión*



*Fuente.* Danfoss. (2020). Guía de selección AQUA Drive FC 202 0,25 kW – 1,4 MW [Archivo PDF]. Nordborg.  
[https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPB202A805\\_FC200\\_SG\\_LR.pdf](https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPB202A805_FC200_SG_LR.pdf)

El sistema ON-OFF se controla por medio de un presóstato que tiene un valor de presión bajo en el que cierra un contacto que activa los contactores o arrancadores suaves de las bombas y un nivel de presión alto en el que el contacto se abre y produce la detención de la bomba(s). Una histéresis alta del presóstato produce una variación de presión demasiado alta mientras que una baja histéresis produce un alto número de arranques en la bomba(s).

El sistema ON-OFF también puede trabajar con varias bombas en paralelo ya sea rotándolas o trabajando con varias al tiempo si la demanda del sistema no puede ser cubierta por

una sola bomba. También existe la opción de la bomba jockey que es una bomba en paralelo de menor capacidad y que se utiliza trabajando sola en momentos de baja demanda o como complemento de una bomba principal para lograr cubrir la demanda.

Los sistemas de bombeo a presión constante con variador de frecuencia pueden constar de una o varias bombas y trabajan por medio de la realimentación de un transmisor de presión que indica al controlador que corrección debe hacer para mantenerse lo más cerca posible al setpoint deseado.

El controlador puede ser un PLC, un sistema embebido o un variador de frecuencia. Este último caso presenta mayores ventajas principalmente cuando se trabaja con varias bombas ya que reduce costos en hardware y tiene menús de programación bastante completos además de que puede controlar varias formas de configuración de sistemas de bombeo como bombas alternas, alterno aditivas o un solo variador y varias bombas que pueden funcionar directamente con la red o con el variador de frecuencia (Ver Figura 66).

Cuando el sistema es de varias bombas y cada una tiene un variador entonces uno de estos debe ser maestro y controlara el arranque y la velocidad de los demás variadores. Sin embargo, si este llega a fallar su bomba debe quedar fuera de servicio y otro variador debe tomar el papel de maestro. En este tipo de sistemas la comunicación entre los variadores se debe realizar preferiblemente por protocolo de comunicaciones ya que si se comunicaran por cableado de señales se aumentaría la complejidad para cambiar de variador maestro.

La facilidad de cambiar de maestro también es una gran ventaja de los sistemas controlados por variador de frecuencia sobre los controlados por PLC o sistema embebido ya que los sistemas que tienen controlador externo tienen una alta dependencia de este y en caso de que el controlador falle todo el sistema quedaría fuera de servicio.

### **Ahorro de Energía con una Sola Bomba en Funcionamiento.**

Para observar el ahorro de energía presente en un sistema de bombeo con variadores de frecuencia a un sistema ON-OFF ya sea de una bomba o alterno de varias bombas iguales se puede tomar el ejemplo de un sistema en el que una bomba trabaja un 80% del tiempo y descansa el 20% restante. El volumen de agua transportado por la bomba sería el 80% del volumen que habría movido si no hubiera descansado. Como trabajó a su velocidad nominal la energía que gastó fue también el 80% de la que hubiera gastado si no hubiera descansado.

Con una bomba con sistema de variación de velocidad habría trabajado sin apagarse a una velocidad del 80% de la nominal y habría transportado también el 80% del volumen de agua. Sin embargo, la energía empleada para realizar esta tarea habría sido del 51.2% con respecto a la que se habría gastado trabajando a velocidad nominal gastando un 36% menos energía que el sistema ON-OFF.

### **Ahorro de Energía con Varias Bombas al Tiempo**

El ahorro de energía más notorio se podría encontrar utilizando varias bombas al tiempo a una velocidad reducida. Sin embargo, las bombas pueden sufrir de cavitación si funcionan a bajas velocidades por lo que es necesario revisar cual podría ser su mínima velocidad de funcionamiento.

Una bomba que trabaje durante un lapso a plena carga puede ser reemplazada con dos bombas con el mismo impeler que trabajen al 50% de la velocidad. Según la Figura 67 cada bomba trabajará a una potencia del 12.5% de la nominal para un total de 25% del consumo de la potencia nominal trabajando con el mismo caudal.

## **Cambios de Velocidad Nominal de Trabajo**

En muchas ocasiones se hace necesario cambiar la velocidad nominal o el rango de velocidad de un motor para mejorar alguna característica del sistema en que funciona o por la frecuencia que maneja la red.

Un ejemplo puede ser el tener un ventilador con un motor con velocidad síncrona de 1200RPM y querer trabajar a 1800RPM ya sea con un nuevo motor o instalando un variador de frecuencia. Es muy común también que lleguen al país máquinas con motores de 50 Hz en arranque directo o que se desee cambiar un motor dahlander por un motor de una sola velocidad con variador de frecuencia.

En todos estos casos es de suma importancia conocer el tipo de aplicación para poder dimensionar el nuevo motor saber si el motor existente tiene la capacidad de trabajar en las condiciones requeridas.

En la Tabla 19 se observa el cambio de potencia y de torque con respecto a la velocidad según el tipo de aplicación. Estas fórmulas son las empleadas para graficar la Figura 23 y la Figura 24.

Para el ejemplo de motores de 50 Hz que llegan al país como parte de máquinas, se puede observar que para aplicaciones de torque variable la potencia demandada por la carga aumenta cerca de un 73% por lo que puede ser necesario reemplazarlos. Para el caso de un ventilador que trabaje a una elevada altura sobre el nivel del mar la carga es mucho menor y puede que llegue a trabajar a su corriente nominal o a un nivel de corriente en el rango de su factor de servicio y no sea necesario reemplazarlo.

Para evaluar si un motor de 50 Hz puede trabajar alimentado a 60 Hz (sin variador de frecuencia) lo más importante es medir la corriente y que esta esté en el rango del factor de

servicio. Es mucho mejor para el motor si el incremento en la tensión de alimentación es igual que el incremento en frecuencia. Por ejemplo, si el motor de 50 Hz tiene una tensión nominal de 380 VAC su tensión de alimentación óptima a 60 Hz sería de 456 VAC.

En estos casos la potencia de trabajo del motor puede ser 1.2 veces superior a la nominal siempre y cuando no haya problemas de aislamiento por trabajar a una tensión superior o problemas en los rodamientos por trabajar a una velocidad más alta. El torque y la corriente serían similares a los nominales por lo que no habría problemas de recalentamiento además de que la ventilación del motor tendría más caudal por la mayor velocidad de la hélice.

La principal desventaja de trabajar motores de 50 Hz a 60 Hz es la menor eficiencia del motor por no estar en sus condiciones nominales sumándole a esto que los motores de 50 Hz son menos eficientes que los de 60 Hz por lo que para un uso prolongado del motor puede ser más rentable reemplazarlo por uno de 60 Hz.

Si el motor se alimenta a 60 Hz, pero a tensión nominal, este tendrá menos torque por lo que estará más limitada su capacidad. Siempre es recomendable consultar con el fabricante del motor sobre su capacidad de trabajo en condiciones no nominales.

**Tabla 19**

*Cambio de torque y potencia del sistema según la aplicación*

	TORQUE VARIABLE	TORQUE LINEAL	TORQUE CONSTANTE	POTENCIA CONSTANTE
Torque	$T_n \left(\frac{N}{N_n}\right)^2$	$T_n \left(\frac{N}{N_n}\right)$	$T_n$	$T_n \left(\frac{N_n}{N}\right)$
Potencia	$P_n \left(\frac{N}{N_n}\right)^3$	$P_n \left(\frac{N}{N_n}\right)^2$	$P_n \left(\frac{N}{N_n}\right)$	$P_n$

*Fuente. Autoría propia*

### Ejemplo de Sustitución de Motores para Aumento de Velocidad

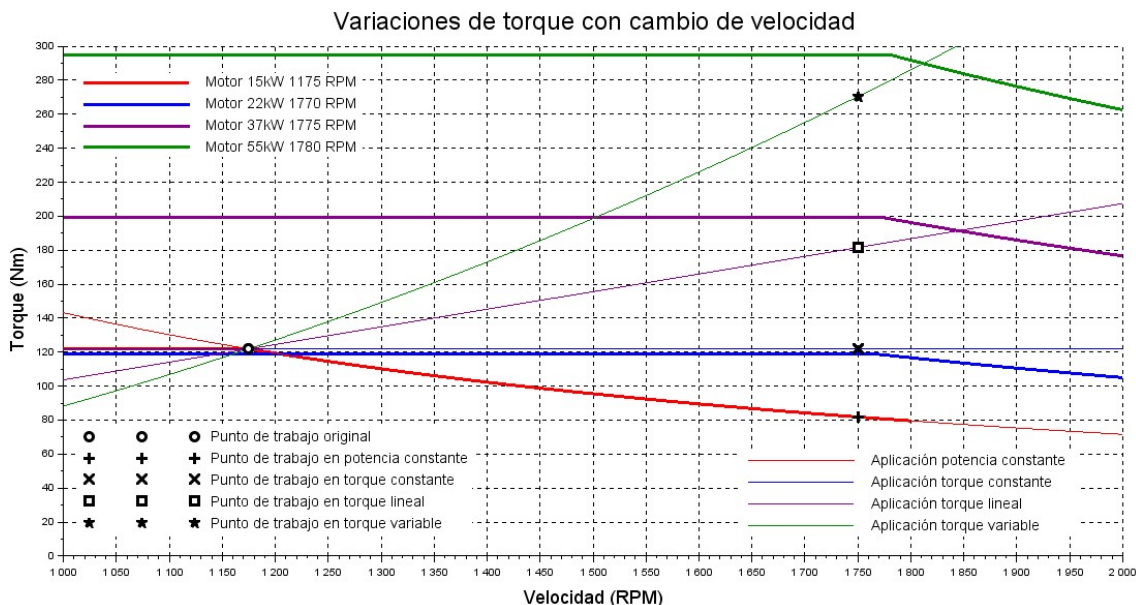
Se tiene un motor con valores nominales de 15 kW de potencia, 1175 RPM, 121.9 Nm y 60 Hz que trabaja a plena carga y que necesita ponerse a trabajar a 1750 RPM. Se desea saber si a la velocidad deseada se puede usar el mismo motor implementando un variador de frecuencia y en caso de que no, se necesitaría saber que motor utilizar.

En la Tabla 20 se observan los valores de torque que debería tener el motor según el tipo de aplicación. En las aplicaciones de torque variable y torque lineal se requiere de motores mucho más grandes y no se podría solucionar el problema implementando un variador de frecuencia.

**Tabla 20**

Valores de torque para ejemplo de motor de 15 kW

TORQUE VARIABLE	TORQUE LINEAL	TORQUE CONSTANTE	POTENCIA CONSTANTE
270.4 Nm	181.6 Nm	121.9 Nm	81.8 Nm



Fuente. Autoría propia

En aplicaciones de torque constante solo sería posible la utilización de un variador de frecuencia si el motor tiene un torque inferior al 32.9% del torque nominal ya que después de superada la velocidad nominal el torque empieza a decaer (ver Tabla 20).

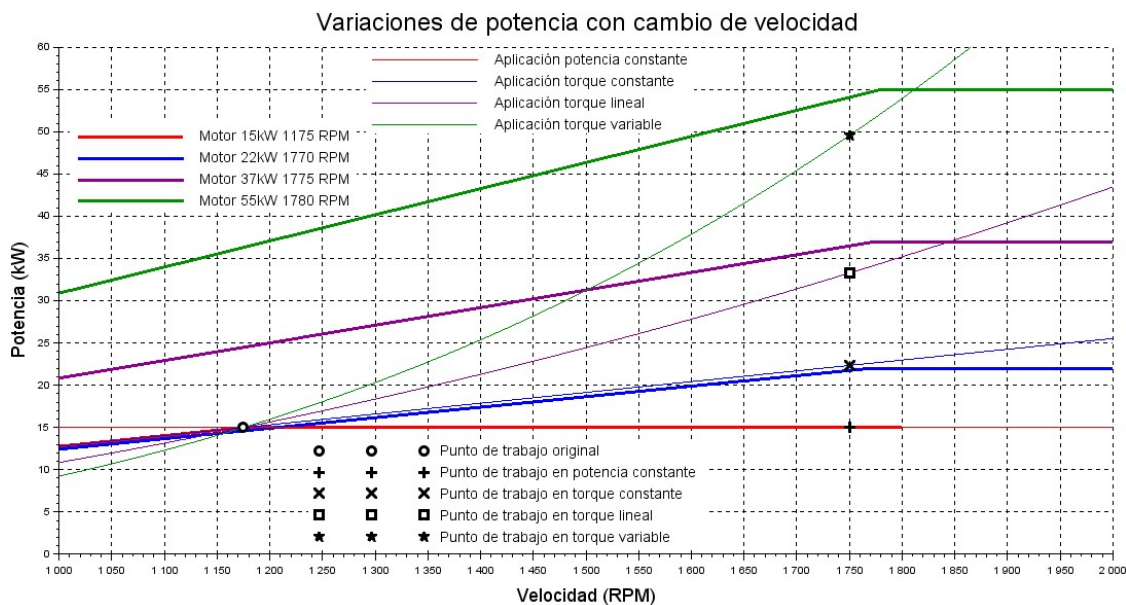
En aplicaciones de potencia constante puede ser viable el uso de un variador de frecuencia ya que el torque demandado por la aplicación decaería al aumentar la velocidad a la par con el decaimiento del torque del motor.

En la Tabla 21 se observa el valor de la potencia que debe tener el motor para trabajar a 1750 RPM según el tipo de aplicación. En una aplicación de torque variable se necesita un incremento de potencia cercano al 300% para aumentar la velocidad un 49%.

**Tabla 21**

*Valores de potencia para ejemplo de motor de 15 kW*

TORQUE VARIABLE	TORQUE LINEAL	TORQUE CONSTANTE	POTENCIA CONSTANTE
45.9 kW	33.3 kW	22.3 kW	15 kW



Fuente. Autoría propia



### ***Ejemplo de Sustitución de Motor Dahlander***

Los motores dahlander son motores de inducción que se destacan por poder trabajar a dos velocidades distintas con una misma tensión de alimentación. Esto se logra gracias a que permiten cambiar la forma de conmutación de sus polos pasando por ejemplo de trabajar con dos polos a trabajar con cuatro polos.

Para este ejemplo se tiene un motor dahlander de norma IEC con las características de la Tabla 22. Es de notar que la potencia del motor no es la misma trabajando con 8 polos que trabajando con 4 polos ya que en la velocidad alta (1730 RPM) desarrolla una potencia máxima de 3,7 kW mientras que en la potencia baja desarrolla solo 2,2 kW. Esto facilita el reemplazo del motor dahlander por un motor de una sola velocidad con variador de frecuencia sin necesidad de realizar un sobre dimensionamiento muy grande.

**Tabla 22**

*Valores de motor dahlander de ejemplo*

Polos	8/4
Potencia	2,2/3,7 kW
Frecuencia	60 Hz
Velocidad angular	865/1730 RPM
Corriente	10,8/13,8 A
Torque	24,3/20,4 Nm
Frame	132S

*Fuente.* WEG. Selección de motores eléctricos, [Online] 12 02, 2020

[http://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_dat\\_web.asp](http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_dat_web.asp)

Si se dimensiona el nuevo motor de una velocidad tomando el torque más alto del motor dahlander (24,3 Nm) y su velocidad más alta (1730 RPM), se tiene como resultado despejando  $P_n$  en la Ecuación (7) (como lo muestra la Ecuación (38)) que un motor de 4,4 kW podría

reemplazar al motor dahlander. Este valor de potencia es muy cercano al de un motor de 6 HP (4,476 kW) por lo que podría ser una buena solución.

$$P_n = 0,1047 N_n T_n \quad (38)$$

La ecuación (38) muestra cómo se despeja la potencia nominal de un motor ( $P_n$ ) en Watos teniendo su velocidad nominal ( $N_n$ ) en RPM y su torque nominal ( $T_n$ ) en Nm.

Los motores de 6 HP tienen el problema de ser muy escasos hasta el punto de estar prácticamente en desuso ya que se fabricaban en eficiencias muy bajas. En la actualidad los motores de eficiencias IE3 y superiores no se fabrican de 6 HP en las principales marcas. Por lo tanto, no se puede tener como solución un motor de 6 HP cuatro polos.

El valor nominal de potencia de motores que sigue a 6 HP es 7.5 HP. Estos motores en cuatro polos tienen un frame 132S en eficiencia IE3. Este es el mismo frame del motor dahlander por lo que sería muy sencillo el reemplazo del motor desde el punto de vista mecánico. El motor de 7.5 HP cuatro polos tendría un torque nominal de 29.7 Nm con velocidad nominal de 1770 RPM pudiendo reemplazar por completo al motor dahlander.

Otra posible opción es un motor de 5 HP seis polos. Este motor tiene un torque nominal de 30.2 Nm y velocidad nominal 1170 RPM con eficiencia IE3 mientras que su frame es el mismo.

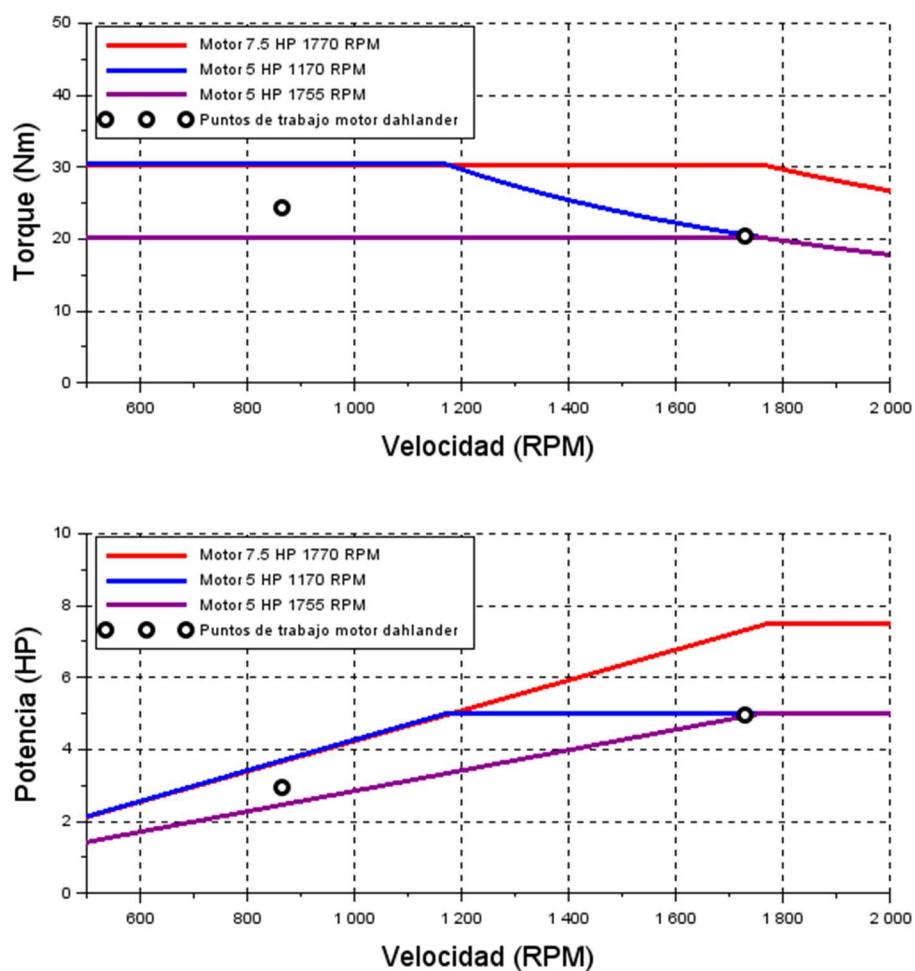
Si la carga es la misma en las dos velocidades del motor dahlander es posible que en la velocidad baja del motor el torque exigido por la carga sea mucho menor que el torque nominal del motor. Solo una aplicación de potencia constante podría requerir mayor torque en la velocidad baja que en la velocidad alta. Si esto se cumple se podría tomar como referencia solo la velocidad mayor del motor dahlander y su torque nominal a esta velocidad. La mejor opción para este caso sería utilizar un motor de 5 HP cuatro polos que tiene frame 112M en eficiencia

IE3 que será más eficiente que el motor de 5 HP seis polos y que al trabajar más cerca de sus valores nominales puede llegar a ser más eficiente que el conjunto de variador y motor de 7.5 HP cuatro polos. Además de resultar más económico que las otras dos alternativas.

En la Figura 69 se ven las curvas de torque y potencia de los motores que pueden servir como reemplazo y los puntos de trabajo del motor dahlander.

**Figura 69**

*Comparación entre motor Dahlander y motores de velocidad fija con VFD*



*Fuente.* Autoría propia

Los puntos de trabajo del motor dahlander son los nominales y pueden variar considerablemente en potencia y torque entre mayor sea la diferencia entre la carga nominal y la

carga de operación. Así mismo con cargas menores el rozamiento disminuye y la velocidad del eje tiende a aproximarse a la velocidad síncrona.

Una forma aún mejor de seleccionar un motor de reemplazo es medir o calcular el torque del motor dahlander en sus puntos de operación con las condiciones de trabajo más pesadas posibles. Esto se puede realizar conectando el motor dahlander a un variador de frecuencia y observando la lectura de torque al trabajar a la misma frecuencia de la red. También se puede calcular el porcentaje de carga midiendo la velocidad del eje con un tacómetro y la corriente para estimar el porcentaje de carga del motor. Tanto con el método del variador o con el método de la medición de velocidad y corriente se deben hacer pruebas con las dos conexiones del motor dahlander.

### **Bombeo Solar**

La facilidad que tienen los variadores de frecuencia para ser energizados con corriente continua ha permitido que se implementen aplicaciones de bombeo para riego y suministro de agua para personas o animales en áreas rurales que no cuentan con suministro de energía eléctrica.

El bombeo solar puede presentar distintas topologías. Las más comunes son las de la Figura 70 y estas pueden presentar variantes además de que pueden existir otras topologías según el entorno y aplicación.

El esquema del lado izquierdo de la Figura 70 tiene como única fuente de alimentación los paneles solares por lo que el motor solo podría activarse en el día. Sin embargo, la salida de los paneles solares puede acoplarse a un convertidor bidireccional DC-DC para cargar un banco de baterías durante el día y permitir la activación del motor cuando sea necesario en la noche. En

muchos casos también es viable acoplar el banco de baterías a la salida de los paneles solares pero la tensión del banco será inferior a la tensión nominal de estos.

Otra forma de almacenamiento de energía que puede funcionar con esta topología es el almacenamiento de agua durante el día en un tanque que se encuentre a una altura apropiada y que tenga la capacidad de suplir la demanda nocturna de agua.

En esta topología la conexión DC+ se realiza en las entradas de línea del variador de frecuencia para aprovechar los diodos del puente rectificador para evitar el flujo de corriente hacia los paneles solares. La conexión DC- se realiza en el bus DC- del variador de frecuencia. El DPS es especial para aplicaciones solares y es muy recomendable emplearlo en este tipo de instalaciones.

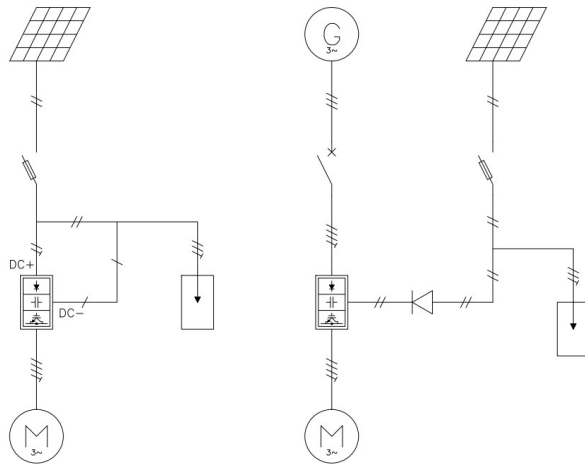
El esquema del lado derecho de la Figura 70 presenta dos fuentes de alimentación. Por un lado, los paneles solares y por el otro un generador de corriente alterna. El generador actúa solo cuando no hay energía suministrada por los paneles solares y se hace necesario arrancar el motor. En esta topología se hace necesario contar con un controlador alimentado con un pequeño banco de baterías para encender el generador cuando sea necesario y no tenerlo encendido durante toda la noche.

Si en vez del generador la conexión se realiza a una red eléctrica no existe inconveniente si hay una conexión simultánea de esta y los paneles solares al variador de frecuencia ya que el bus DC se energizará con la tensión más alta ya sea la del rectificador o la de los paneles. Si la tensión DC en el rectificador es más alta, el diodo antirretorno evitará que esta llegue a los paneles solares. Si la tensión es más alta en los paneles, el puente rectificador no permitirá el paso de energía hacia el bus DC. Sin embargo, puede pasar que se quiera trabajar con una

tensión menor en los paneles que en el rectificador por lo que se debería instalar un contactor que corte el suministro de la red mientras los paneles tengan un nivel de tensión aceptable.

**Figura 70**

*Principales topologías de bombeo solar*



*Fuente:* Autoría propia

La conexión múltiple de red y paneles solares puede ser implementada en conjuntos residenciales de torres por ejemplo para elevar el agua y mantener una presión adecuada ahorrando en costos de energía eléctrica durante el día. Incluso se puede instalar un inversor para llevar la energía sobrante de los paneles en el día hacia la red para que sea comprada por el proveedor de energía eléctrica y así suplir los costos de suministro de energía eléctrica para bombeo en la noche ya sea de forma parcial o total.

Las aplicaciones de bombeo solar pueden funcionar tanto con variadores de frecuencia convencionales como con variadores solares especializados. Las principales diferencias que presentan los variadores solares son su capacidad de trabajar con un rango de tensión más amplio en el bus DC y contar con un algoritmo MPPT para seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles solares. Esto les permite ser más versátiles y obtener un mayor rendimiento del sistema.

Los rangos de tensión de entrada de los variadores de frecuencia convencionales son de 200-240 VAC y 380-480 VAC para motores con rangos similares. Estos rangos a plena carga producen tensiones en el bus DC de 270-324 VDC y 513-648 VDC respectivamente. Los valores de tensión de alimentación más comunes para variadores solares son de 185-410 VDC para motores con tensiones de alimentación entre 200 y 240 VAC y 345-800 VDC para motores con tensiones de alimentación entre 380 y 480 VAC.

Parte de los variadores solares están diseñados para recibir también alimentación de corriente alterna. Para este caso los rangos de tensión de alimentación son los mismos de los variadores convencionales. En la mayoría de los casos los fabricantes de variadores de frecuencia utilizan el mismo frame para variadores convencionales y para variadores solares por lo que no se pueden distinguir unos de otros a simple vista.

Como se puede observar los rangos de tensión en los variadores solares son más amplios e incluso se traslapan. Estos valores no están tan estandarizados como en los variadores convencionales y pueden depender del fabricante. La capacidad de los variadores solares para trabajar con bajas tensiones cuando las condiciones climáticas merman la capacidad de los paneles solares permite seguir operando los motores de las bombas a menores velocidades con potencia reducida. Esta es una gran ventaja que evita el tener que detener los motores.

El bombeo con paneles solares presenta su máximo rendimiento en llenado de contenedores de agua ya que el control de variables como presión o caudal se puede dificultar por la variabilidad de la capacidad de los paneles solares a menos que estos estén bastante sobre dimensionados.

Para dimensionar los paneles solares se deben tener en cuenta la potencia de salida máxima ( $P_{max}$ ) de cada panel, su tensión en circuito abierto ( $V_{OC}$ ), la tensión en el punto de máxima potencia ( $V_{mpp}$ ) y la corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mpp}$ ).

La tensión DC que deben suministrar los paneles es la tensión nominal del motor multiplicada por 1.35. La corriente DC que deben suministrar los paneles es la corriente nominal de salida del variador de frecuencia multiplicada por 0.817 (ABB, 2014).

### **Cargas Regenerativas**

Las cargas regenerativas son aquellas que presentan una alta inercia y devuelven energía a la red cuando se reduce su velocidad forzadamente por reducción de frecuencia en el motor. Un ejemplo de carga regenerativa de este tipo puede ser una centrifugadora. También son cargas regenerativas las que producen una aceleración del motor haciendo que este trabaje como generador. Esto sucede generalmente con las aplicaciones de levantamiento de cargas durante el descenso.

Para el primer caso se puede optar por desconectar la salida del variador de frecuencia del motor haciendo que su inversor deje de conmutar. Sin embargo, en ciertos casos es posible que la carga quede girando por horas lo cual generalmente retrasaría los procesos. Por lo tanto, en estos casos el objetivo del frenado es únicamente apresurar la detención de la carga. Las aplicaciones de este tipo por lo general trabajan en dos cuadrantes por lo que se pueden considerar de la categoría dos que se explica en el capítulo de Regeneración Y Frenado.

En el segundo caso el frenado del motor pasa de ser una mejora en el proceso a ser algo obligatorio ya que la carga es impulsada por la fuerza de gravedad o tiene una inercia que no le permite detenerse por sí sola y la ausencia de un freno haría que el proceso fuera incontrolable. Las aplicaciones de este tipo por lo general implican elevación de cargas y trabajan en los cuatro



cuadrantes por lo que pertenecen a la categoría tres que se explica en el capítulo de Regeneración y Frenado.

Los procesos que utilizan las aplicaciones de la categoría dos generalmente presentan tiempos de arranque y detención que son despreciables con respecto al tiempo total del proceso ya que estas aplicaciones comúnmente trabajan a una velocidad constante por lo que solo hay regeneración en el momento de la detención.

Los procesos que utilizan aplicaciones de la categoría tres en cambio presentan regeneración cada vez que se presenta el descenso de una carga o cada vez que se detiene forzosamente una carga que va en ascenso. En este tipo de aplicaciones la regeneración está presente todo el tiempo.

La diferenciación de las dos categorías de aplicaciones regenerativas es muy importante para seleccionar el método de frenado más apropiado. Los rectificadores AFE en apariencia son el mejor método para el manejo de cargas regenerativas ya que devuelven la energía regenerada a la red, mitigan armónicos y ocupan menos espacio que otras soluciones para cargas regenerativas entre otras aparentes ventajas.

Sin embargo, el rectificador AFE tiene una enorme desventaja que no se debe tomar a la ligera y es su menor eficiencia con respecto a un rectificador convencional de diodos. Esta desventaja hace que en aplicaciones de la categoría dos pueda ser más eficiente usar resistencias de frenado que un rectificador AFE.

La razón es que durante un proceso largo que solo presenta regeneración por un breve periodo, la energía que se devuelve a la red no compensa la energía adicional que se ha gastado por la menor eficiencia del rectificador, por lo que es más eficiente usar un rectificador convencional y convertir la energía regenerada en calor por medio de las resistencias de frenado.

Por otra parte, la eficiencia de los AFE para devolver energía a la red es aún menor que la eficiencia que tienen rectificando.

Los módulos regenerativos en teoría podrían funcionar en aplicaciones de categorías dos o tres ya que solo actuarían en el momento de la regeneración y en ausencia de esta el sistema tendría una eficiencia normal. Sin embargo, en aplicaciones del tipo dos habría que evaluar el retorno de inversión en comparación con un sistema de resistencias de frenado ya que entre más corto sea el tiempo que dura la regeneración y mayor sea el lapso entre una y otra regeneración, más largo se hará el tiempo de retorno de inversión.

El bus DC compartido es compatible con las dos categorías de aplicaciones regenerativas y si existe la viabilidad de instalarlo puede ser más económico y eficiente que los demás métodos para control de cargas regenerativas. Lo importante en estos sistemas es que siempre exista una demanda de energía por parte de otros inversores que sea equiparable a la energía regenerada. Por ejemplo, en un puente grúa que realiza movimiento vertical y horizontal al mismo tiempo la energía regenerada por una carga en descenso puede ser consumida por los inversores de los motores que producen el movimiento en el eje x y en el eje y.

Como se observa en la Figura 54 el sistema de bus DC compartido puede estar acompañado de otro método de frenado en caso de que no exista una demanda de energía en otra parte del sistema.

### **Enrolladora**

Las aplicaciones de enrollado o embobinado están dentro de las más complejas que se pueden realizar con variadores de frecuencia. El objetivo de estas aplicaciones es realizar el enrollado de un material de forma óptima lo cual se logra manteniendo un valor de tensión

constante en el material. Cuando se trabaja en lazo cerrado de tensión esta se mide indirectamente por medio de una celda de carga que hace contacto con el material a enrollar.

Según el tipo de aplicación el material a enrollar puede venir de otro rollo o de un proceso. En muchas ocasiones se necesita también trabajar en conjunto con un motor que desenrolle el rollo primario o que entregue material al rollo secundario ya que de lo contrario la tensión de halar el material puede ser superior a la que este pueda resistir y este se puede romper.

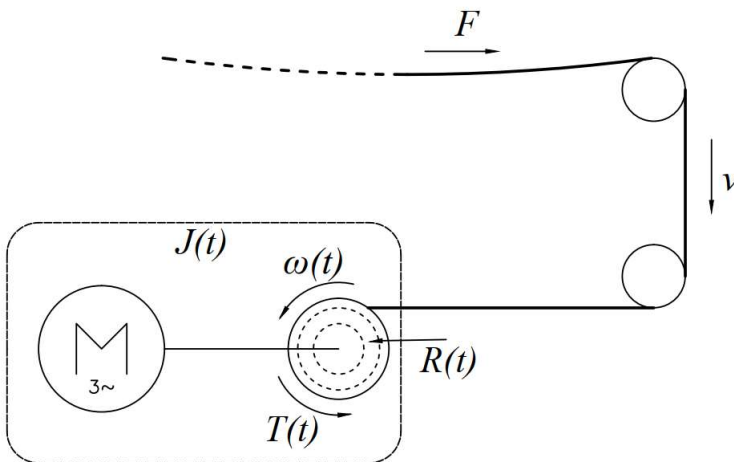
El proceso de enrollado puede realizarse por medio de control de torque o por medio de control de velocidad. El primero requiere menos elementos externos, pero solo funciona correctamente en las aplicaciones más básicas. El segundo es apto para aplicaciones más complejas, pero requiere de más elementos externos.

Uno de los desafíos de los sistemas de enrollado es mantener una velocidad lineal constante lo cual se logra variando la velocidad del rollo de acuerdo con su diámetro. Para la medición del radio del rollo se pueden utilizar distintos tipos de sensores dependiendo del material y de su forma.

En la Figura 71 se observa el esquema básico de una aplicación de enrollado con las principales variables que intervienen en el sistema.  $F$  es la tensión del material,  $v$  es la velocidad lineal del material,  $\omega(t)$  es la velocidad angular del sistema,  $R(t)$  es el radio del rollo,  $T(t)$  es el torque en el eje del rollo y  $J(t)$  es la inercia del sistema.

**Figura 71**

*Esquema básico de una aplicación de enrollado*



*Fuente. Autoría propia*

### ***Enrollado por Control de Velocidad***

El enrollado por control de velocidad tiene la gran ventaja de no depender de la inercia del sistema por lo que puede tener aceleraciones y desaceleraciones rápidas. Sin embargo, el control de velocidad por sí solo no es suficiente para regular la tensión en un rango aceptable por lo que se requiere de actuadores que trabajen en conjunto con el sistema.

Estos actuadores agregan una mayor precisión al sistema tensando o soltando el material según el error del sistema. Los principales tipos de actuadores pueden ser frenos neumáticos, frenos de partículas magnéticas, embragues y dancers.

El variador de frecuencia recibe una referencia de velocidad que se calcula para mantener una velocidad lineal constante a medida que el rollo cambia de tamaño. Mientras tanto los actuadores trabajan de acuerdo con el error de la realimentación de tensión del material del rollo. Los actuadores pueden ser controlados por un PLC, un controlador especializado o por el mismo variador de frecuencia si este cuenta con funciones de PLC.

Las principales ventajas del control de velocidad son que se puede usar un variador de frecuencia con un sistema de control básico que incluso puede ser de lazo abierto, la posibilidad de trabajar con cajas reductoras y la gran reducción de la influencia de la inercia del sistema.

La principal desventaja es la necesidad de contar con actuadores junto con sus respectivos controladores.

### ***Enrollado por Control de Torque***

El enrollado por control de torque por su parte mantiene la tensión del material en base al torque del motor. El uso de realimentación por encoder es prácticamente imprescindible. Para una mayor precisión también se puede usar un sensor de tensión al igual que en el control por velocidad. El diámetro del rollo debe ser conocido, así como en el control de velocidad ya que el torque debe aumentar a medida que aumenta el rollo para poder mantener una tensión constante.

El torque que debe suministrar un motor en un proceso de enrollado está definido en la ecuación (39).

$$T(t) = J\dot{\omega}(t) + B\omega(t) + FR(t) \quad (39)$$

Donde  $T(t)$  es el torque que debe suministrar el motor,  $J$  es la inercia de todo el sistema,  $\dot{\omega}(t)$  es la aceleración angular del eje del motor,  $B$  es el coeficiente de fricción de viscosidad,  $F$  es la tensión del material y  $R(t)$  es el radio del rollo.

En el control de torque los términos  $J\dot{\omega}(t)$  y  $B\omega(t)$  y deben ser despreciables con respecto a  $FR(t)$  ya que el control de torque se fundamenta en mantener la tensión constante calculándola en base al torque.

### ***Ejemplo de Enrollado de Papel***

A continuación, se presenta la simulación de un sistema de enrollado de papel. En la Tabla 23 se encuentran los parámetros del sistema.

En los sistemas de enrollado la tensión  $F$  y la velocidad lineal del sistema  $v$  se mantienen constantes en el lapso que se encuentra entre las rampas de arranque y parada.

Por su parte la velocidad angular del rollo  $\omega(t)$  aumenta rápidamente en el arranque hasta alcanzar un rango de velocidad de trabajo. Posteriormente empieza a disminuir lentamente hasta llegar al fin del proceso cuando baja de forma rápida hasta que el rollo se detiene. La velocidad angular depende del radio del rollo  $R(t)$ . Como este aumenta, la velocidad angular debe disminuir para mantener una velocidad lineal constante como lo muestra la ecuación (40).

$$\omega(t) = \frac{v}{R(t)} \quad (40)$$

La aceleración angular  $\dot{\omega}(t)$  es positiva solo en el arranque. Si se tiene una rampa de arranque lineal la aceleración angular es constante durante el arranque. Después del arranque la aceleración es negativa y de baja magnitud hasta que llega el momento de detener el rollo cuando esta se incrementa en magnitud hasta que el rollo se detiene por completo.

La inercia del sistema  $J(t)$  al empezar el proceso es igual a la suma de la inercia del motor más la inercia de los componentes del sistema. Como el diámetro y/o la masa del rollo aumentan a medida que recibe material entonces la inercia también aumenta.

**Tabla 23***Datos del ejemplo de enrollado*

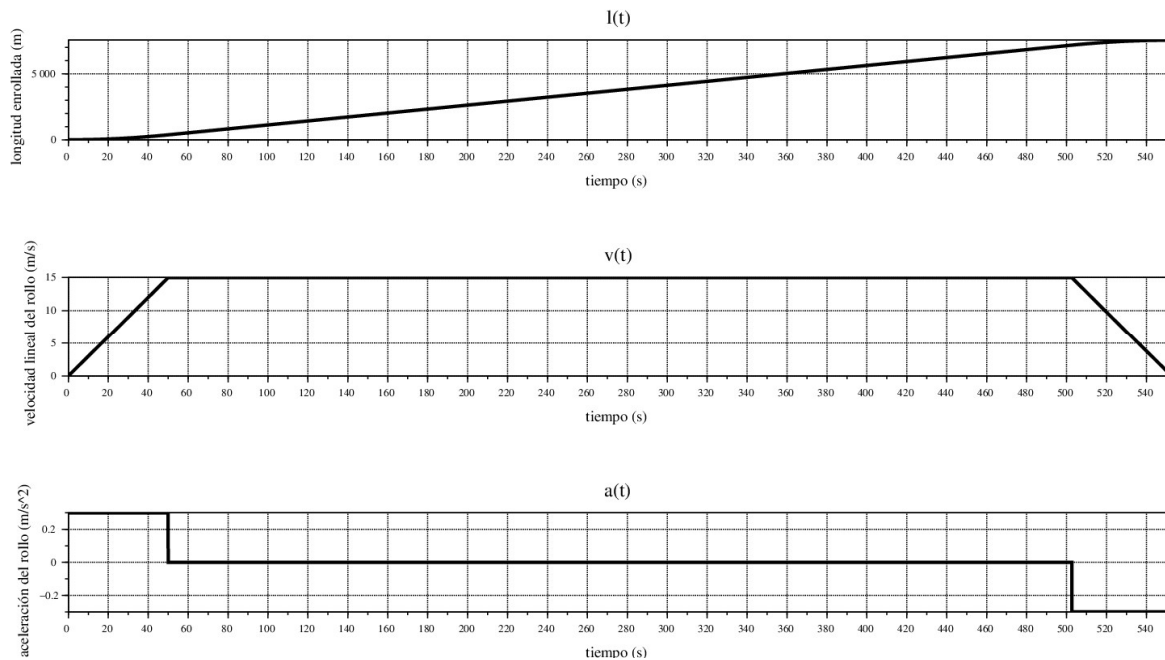
Densidad del carrete	7850 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del papel	780 kg/m <sup>3</sup>
Espesor del papel	1x10 <sup>-4</sup> m
Ancho del rollo	1 m
Radio menor del carrete	0.08 m
Radio superior del carrete	1 m
Radio máximo del rollo de papel	0.5 m
Inercia del motor	3.835 kg m <sup>2</sup>
Tensión del rollo	15 N
Velocidad lineal de enrollado	10 m/s
Tiempo de aceleración lineal	50 s
Tiempo de desaceleración lineal	50 s
Coefficiente de fricción	0.05 (kg m <sup>2</sup> )/(rad s)

*Fuente.* Autoría propia

En la Figura 72 se observa en la gráfica superior cómo entre el arranque y la parada la longitud del rollo  $l(t)$  aumenta de forma lineal, en la gráfica del medio se observa como la velocidad lineal  $v(t)$  se mantiene constante entre el arranque y la parada y en la gráfica inferior como la aceleración lineal  $a(t)$  es nula entre el arranque y la parada.

**Figura 72**

*Longitud, velocidad y aceleración con respecto al tiempo*



*Fuente.* Autoría propia

En la Figura 73 se observa en la gráfica superior la forma en que aumenta el ángulo del rollo  $\theta(t)$  con respecto al tiempo. En la gráfica del medio se observa como decrece la velocidad angular  $\omega(t)$  entre el arranque y la parada.

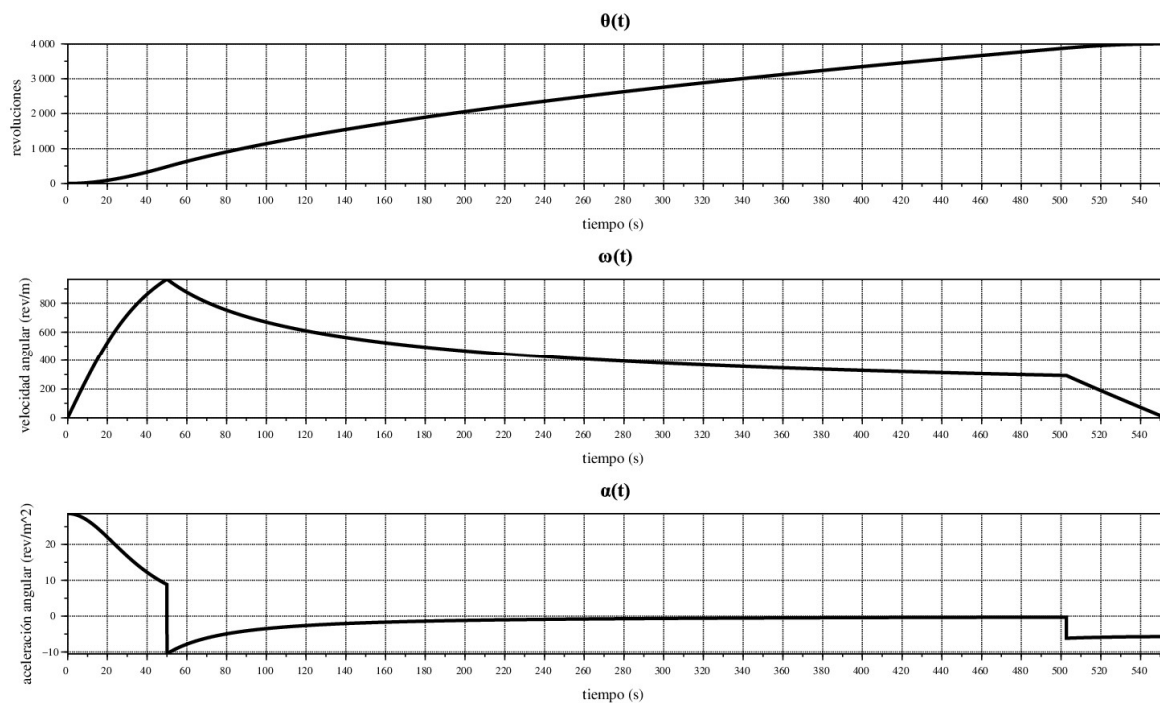
Las rampas de aceleración y desaceleración no son lineales con respecto a la velocidad angular como si lo son con respecto a la velocidad lineal como se observó en la Figura 72. En el arranque se tiene una rampa de aproximadamente 0 a 967 rpm en 50 segundos mientras que en la parada la rampa es aproximadamente de 294 a 0 rpm en 50 segundos.

En la gráfica inferior de la Figura 73 se observa la aceleración angular  $\dot{\omega}(t)$ . En las transiciones entre las rampas y velocidad lineal constante se observan caídas abruptas que muy posiblemente pueden producir regeneración y por lo tanto sobre tensión en el circuito intermedio del variador de frecuencia por lo que se hace necesaria la implementación de un sistema de frenado en el sistema.



**Figura 73**

*Ángulo, velocidad y aceleración angulares con respecto al tiempo*



*Fuente.* Autoría propia

En la gráfica superior de la Figura 74 se observa como varía el radio del rollo con respecto al tiempo. El aumento del radio del rollo se produce cada vez de forma más lenta debido a que la velocidad lineal es constante mientras que el perímetro del rollo aumenta en cada revolución y la velocidad angular es cada vez más baja.

En la gráfica inferior de la Figura 74 se observa la curva de la inercia del sistema con respecto al tiempo. Esta inercia es igual a la suma del momento de inercia del motor ( $0.114 \text{ kg m}^2$ ), el momento de inercia del carrete del rollo ( $0.728 \text{ kg m}^2$ ) y el momento de inercia del rollo que es variable.

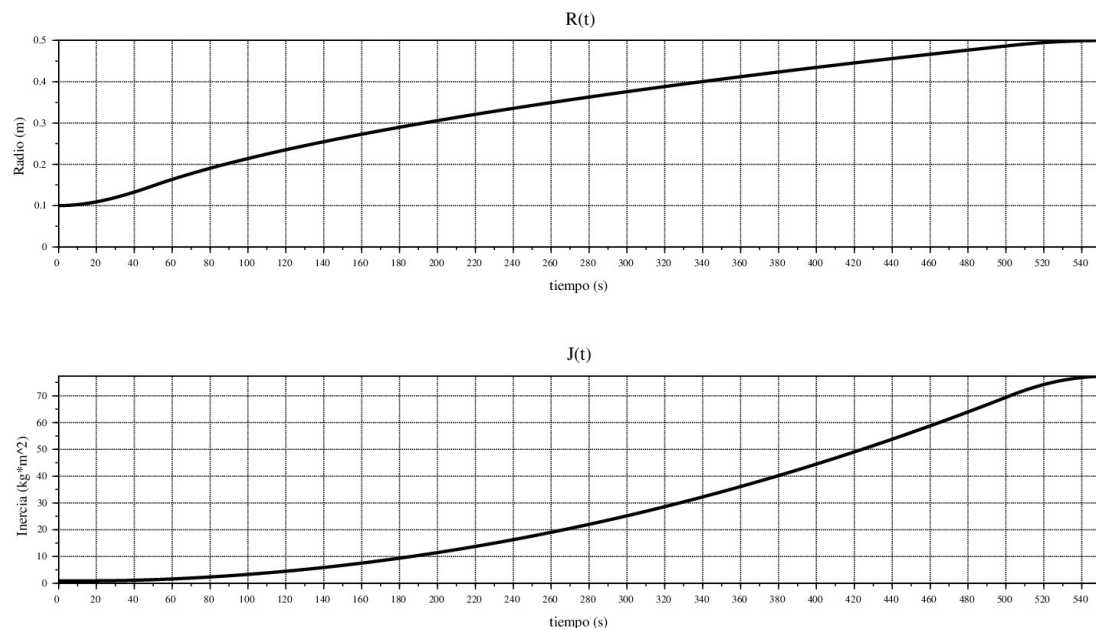
El momento de inercia del rollo es mucho mayor al del motor y el carrete ya que al terminar el proceso este es de  $76.45 \text{ kg m}^2$ . El momento de inercia del rollo de papel depende del radio del rollo elevado al cuadrado y de la masa del rollo como lo muestra la ecuación (41).

$$J_p(t) = \frac{m_p(t) \left( (R_p(t))^2 + R_c^2 \right)}{2} \quad (41)$$

Donde  $J_p(t)$  es el momento de inercia del rollo de papel,  $m_p(t)$  es la masa del rollo de papel respecto al tiempo,  $R_p(t)$  es el radio del rollo con respecto al tiempo y  $R_c$  es el radio del carrete.

**Figura 74**

*Radio del rollo e inercia con respecto al tiempo*



*Fuente.* Autoría propia

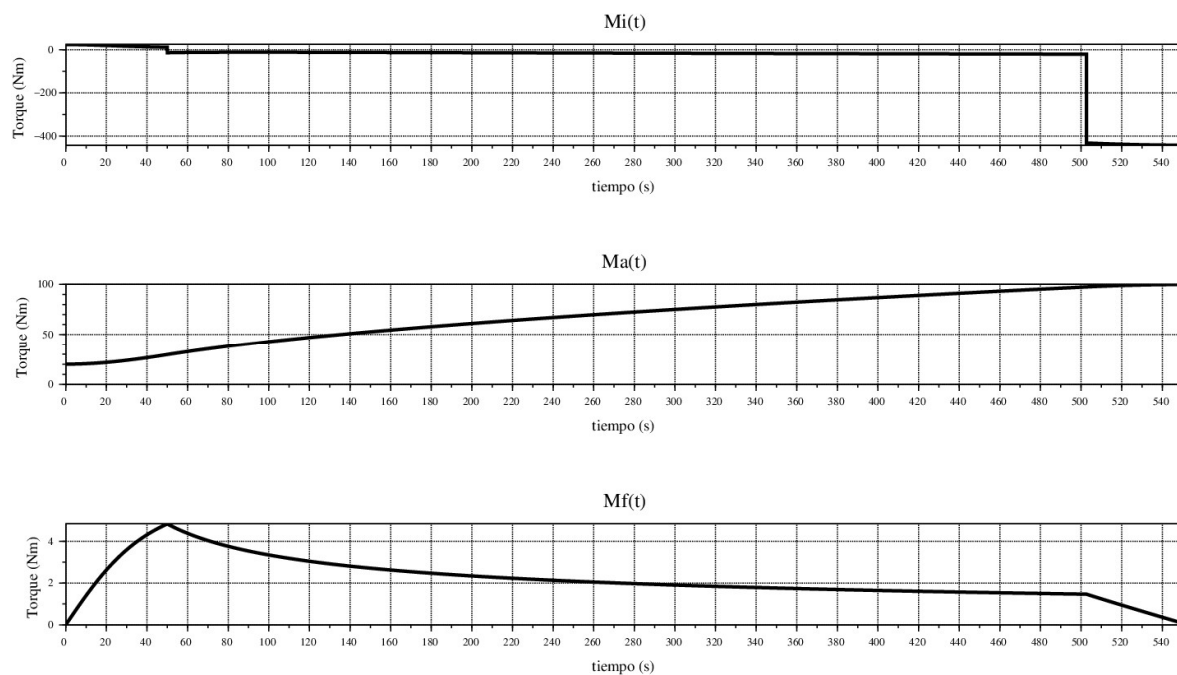
En la gráfica superior de la Figura 75 se observa el torque que ejerce el motor para vencer la inercia del sistema. Este solo es relevante en la rampa de parada donde toma un valor negativo. En la rampa de arranque su valor es bajo debido a que el rollo tiene una masa y un radio pequeños con el radio y la masa finales del rollo. Esto implica una baja inercia.

En la gráfica de en medio de la Figura 75 se observa el torque que ejerce el motor para realizar la tarea de enrollado. Su comportamiento es casi lineal entre las rampas de arranque y parada y casi constante durante estas.

En la gráfica inferior de la Figura 75 se observa el torque que ejerce el motor para vencer la fuerza de fricción. Como se observa en la ecuación (39) este torque depende de la tensión del papel  $F$  que es constante y de la velocidad angular  $\omega(t)$  por lo que tiene la misma forma de esta última.

**Figura 75**

*Torques con respecto al tiempo*



*Fuente.* Autoría propia

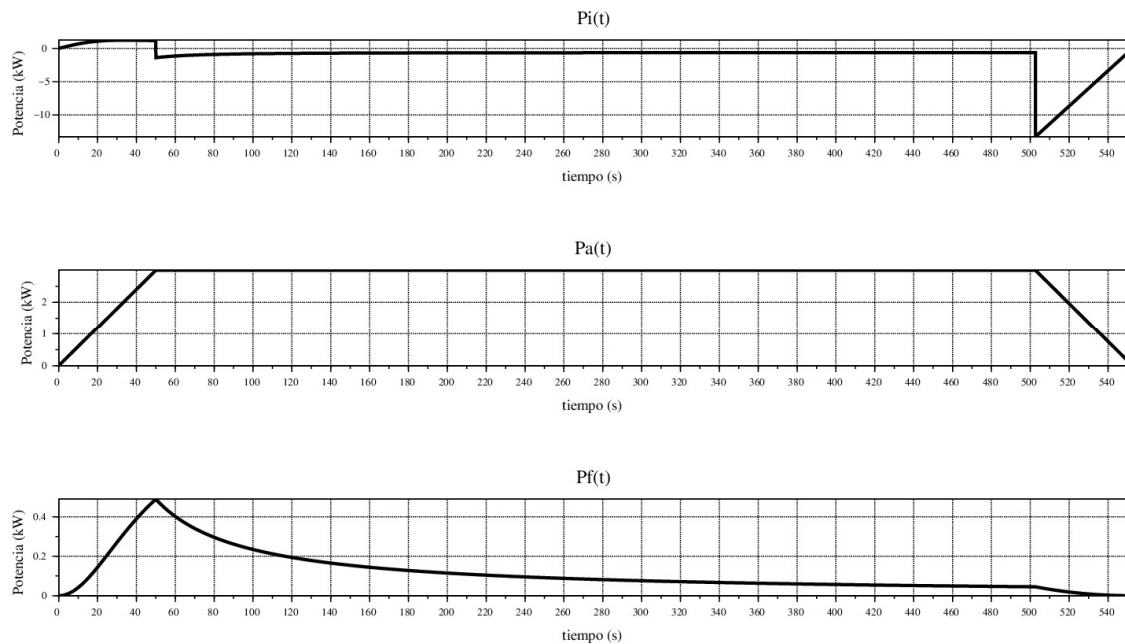
En la gráfica superior de la Figura 76 se observa la potencia ejercida por el motor para vencer la inercia del rollo la cual al igual que el torque solo es relevante en la rampa de parada tomando un valor negativo.

En la gráfica de en medio de la Figura 76 se observa la potencia ejercida por el motor para realizar la tarea de enrollado. Esta es lineal en las rampas y constante entre estas por lo que se deduce claramente que las aplicaciones de enrollado son del tipo potencia constante.

En la gráfica inferior de la Figura 76 se observa la potencia ejercida por el motor para vencer la fuerza de fricción. Esta es igual al producto del torque por fricción  $M_f(t)$  y la velocidad angular  $\omega(t)$ .

**Figura 76**

*Potencias con respecto al tiempo*

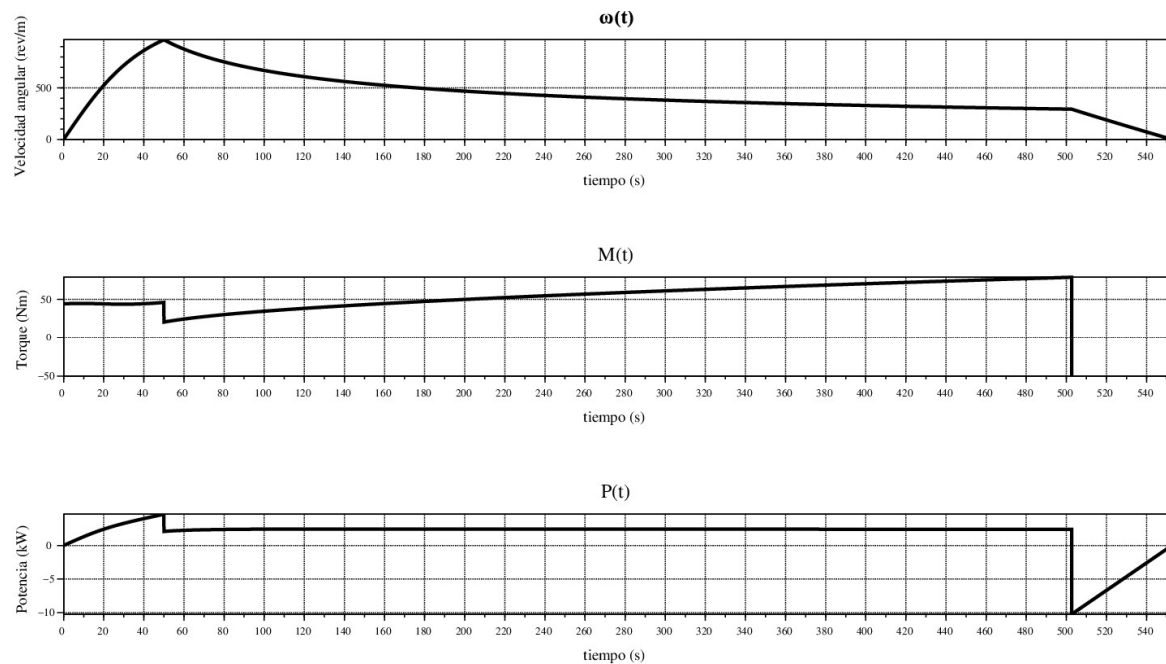


*Fuente.* Autoría propia

Por último, en la Figura 77 se observan las principales variables del sistema que son la velocidad angular  $\omega(t)$ , El torque total  $M(t)$  y la potencia total  $P(t)$ .

**Figura 77**

*Principales variables con respecto al tiempo*



*Fuente.* Autoría propia

Tanto la potencia como el torque presentan su mayor magnitud en la rampa de parada tomando ambas variables un valor negativo lo que indica una inversión del flujo de potencia que al tener una magnitud muy alta hace necesario tener que usar alternativas como sobredimensionar de una forma considerable el motor y el variador de frecuencia para que tengan capacidad de usar un frenado dinámico o regenerativo. Esta alternativa genera mayores costos de fabricación del sistema, pero ofrece un buen tiempo para realizar el proceso y permite recuperar energía si se usa un frenado regenerativo.

Otra alternativa es alargar de forma considerable la rampa de parada para reducir el flujo de potencia del motor al variador y poder usar un método de frenado eléctrico sin necesidad de sobredimensionarlos. Esta alternativa alarga el tiempo del proceso, pero es la más económica y permite recuperar energía si se usa frenado regenerativo.

La última alternativa es detener el rollo por medio de un freno mecánico lo cual ofrece un buen tiempo en la ejecución del proceso, es relativamente económica pero no permite recuperar energía ya que la regeneración solo se produce en la rampa de parada.

### **Aumento de Potencia en Motores con Conexión $\Delta$ -Y**

Los motores trifásicos de inducción que manejan conexión  $\Delta$ -Y cuentan con una caja de conexiones de seis bornes y manejan dos niveles de tensión un nivel bajo que por ejemplo puede ser 220 VAC y un nivel alto que es igual al nivel bajo por raíz de tres en este caso sería aproximadamente 380 VAC.

El aislamiento del motor en conexión  $\Delta$  es el mismo que en Y por lo que podría realizarse sin problemas la conexión de  $\Delta$  aplicando el nivel de tensión para Y. Para realizar este procedimiento es necesario emplear un variador de frecuencia ya que se debe manejar la misma relación tensión-frecuencia que tiene el nivel de conexión para garantizar el flujo magnético apropiado. Para el motor de 220 VAC, 50 Hz es de 4.4 VAC por Hz.

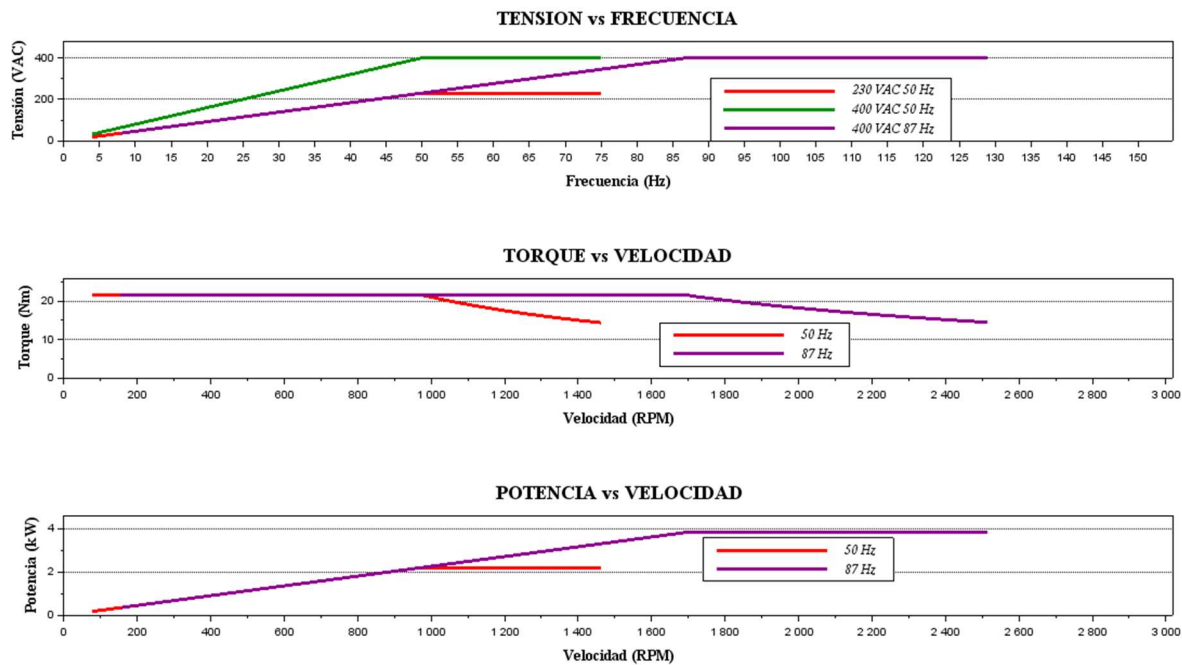
Esta técnica de aumento de potencia en motores trifásicos de inducción con conexión  $\Delta$ -Y es conocida como la técnica de 87 Hz ya que principalmente se aplica a motores de 50 Hz y como la tensión aplicada se aumenta en forma proporcional a la frecuencia (multiplicando ambas por raíz de tres) entonces se llega a este nivel de frecuencia. Si la técnica se aplica a un motor de 60 Hz se podría llegar a trabajar a 104 Hz. Esta técnica es viable eléctricamente, pero se debe revisar con detenimiento si el motor es capaz de trabajar mecánicamente bajo estas condiciones, si se deben hacer modificaciones como cambio de rodamientos, si se puede configurar 87 Hz como frecuencia nominal trabajando a frecuencias más bajas o si simplemente no es viable aplicar esta técnica.

Cuando se trabaja de forma convencional más allá de la frecuencia nominal del motor se entra en la zona de potencia constante o debilitamiento de campo donde la tensión de alimentación se mantiene mientras que la frecuencia aumenta y la velocidad del eje aumenta mientras que el torque decae de forma inversamente proporcional a la velocidad. Con la técnica de 87 Hz el par no decae ya que se cambia la frecuencia nominal del motor y el punto nominal original de trabajo tiene la misma relación tensión frecuencia del punto modificado.

En la Figura 78 se observan las distintas relaciones entre las variables eléctricas y mecánicas de un motor de 2.2 kW, 50 Hz, de seis polos con conexión delta a 230 VAC y estrella a 400 VAC trabajando con velocidad variable con una frecuencia nominal de 50 Hz y con la técnica de 87 Hz. En la gráfica de tensión vs frecuencia la gráfica de 230 VAC, 50 Hz es igual a la de 400 VAC, 87 Hz en la región de torque constante. En la gráfica de torque vs velocidad se observa como con la técnica de 87 Hz se puede mantener el mismo torque a velocidades más altas. En la gráfica de potencia vs velocidad se observa claramente el incremento de potencia del motor con la técnica de 87 Hz.

Figura 78

Comparación entre conexión normal y conexión de 87 Hz



Fuente. Autoría propia

El ejemplo de la Figura 78 es similar a reemplazar un motor de seis polos por un motor de cuatro polos con el mismo torque, aunque el motor de cuatro polos puede mantener su máximo torque en menos de 1462 RPM mientras que con la técnica de 87 Hz se puede mantener el máximo torque a un poco menos de 1689 RPM (en ambos casos tomando un deslizamiento de 2.5%).

El modo de trabajo de 87 Hz tiene como principales ventajas aumentar el rendimiento del motor y tener una inercia más baja en comparación a la de un motor con la potencia nominal obtenida gracias a la menor masa del rotor del motor que usa la técnica de 87 Hz. Las principales desventajas son la menor robustez mecánica del motor y la menor eficiencia comparado con uno de potencia nominal similar a la que se alcanza con la técnica de 87 Hz.



El variador de frecuencia seleccionado para trabajar en la técnica de 87 Hz debe poder suministrar la corriente demandada por el motor en conexión  $\Delta$  y la tensión requerida para la conexión Y.

### **Varios Motores con un Solo Variador**

El uso de varios motores con un solo variador es un método que se puede utilizar para reducir costos cuando se puede prescindir de un variador de frecuencia para cada motor ya sea activando todos los motores al tiempo con un solo variador o activando un motor a la vez.

También puede presentarse el caso de sistemas mixtos con varios motores que pueden funcionar con la red o con variador de frecuencia o con ambos a la vez.

### ***Motores en Paralelo***

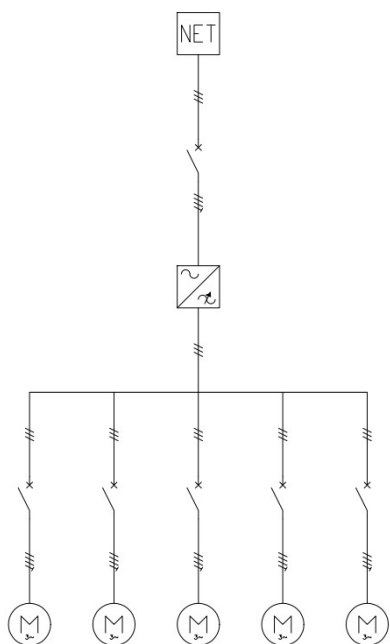
En ocasiones para reducir costos en aplicaciones que no exigen mayor precisión de torque y/o velocidad es posible alimentar varios motores con un solo variador de frecuencia cuando el arranque y parada de estos se realiza al tiempo. Un ejemplo puede ser el esquema de la Figura 79 donde un solo variador activa cinco motores.

Para seleccionar el variador se debe evitar caer en el error de sumar las potencias de los motores y tomarlos como un motor equivalente ya que los motores entre más pequeños presentan una menor eficiencia y un coseno phi más bajo implicando una mayor corriente para lograr una misma potencia. Por ejemplo, suponiendo que los cinco motores de la Figura 79 sean de cinco HP, 440 VAC, cuatro polos IE3 se tiene una corriente nominal aproximada de 6.78 A que multiplicado por cinco motores da 33.9 A, mientras que un motor de 25 HP con las mismas características tiene una corriente nominal aproximada de 32 A. Aunque la diferencia no parece ser mucha puede acentuarse más cuando se manejan más motores y unos cuantos amperios

pueden marcar la diferencia para tener que seleccionar un variador de frecuencia de más potencia.

**Figura 79**

*Varios motores en paralelo con un solo variador*



*Fuente. Autoría propia*

Como el variador no está en capacidad de proteger a cada motor por separado, es necesario que cada motor cuente con una protección entre el motor y él ya que una sobre carga o incluso un cortocircuito puede llegar a ser imperceptible para el variador y más aún si los demás motores tienen una baja carga. En el mercado no existen interruptores ni guardamotors especializados para llevar a cabo este tipo de protección por lo que se debe realizar una selección cuidadosa buscando que las protecciones existentes en el mercado puedan realizar bien su tarea.

La distorsión armónica de corriente, los impulsos de tensión y la posibilidad de la aparición del fenómeno de onda reflejada son elementos que pueden afectar el correcto funcionamiento del elemento de protección. Por lo general este tipo de sistemas se realizan con

motores de bajas potencias por lo que el elemento empleado es un guardamotor. Este por defecto está diseñado para funcionar a 60 Hz con una tensión máxima de 690 VAC.

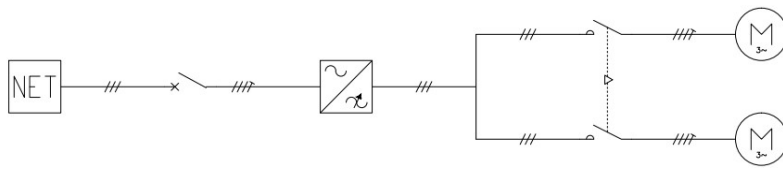
Las principales recomendaciones para el correcto funcionamiento de estos sistemas son trabajar con la frecuencia de conmutación más baja posible, si es necesario utilizar un reactor de carga, filtro  $dv/dt$  o filtro seno para evitar sobre impulsos de tensión, realizar la instalación del guardamotor del lado del motor y no del lado del variador, buscar que las distancias de cable del variador al motor sean lo más cortas posibles, seleccionar el guardamotor para que funcione en la parte más baja de su rango.

“Las mayores precauciones se deben tener cuando el sistema es alimentado por una tensión mayor a 240 VAC ya que a valores iguales o menores es poco probable la aparición de los problemas antes mencionados” (Allen Bradley, 2016, p. 5).

### ***Sistema de Alternación***

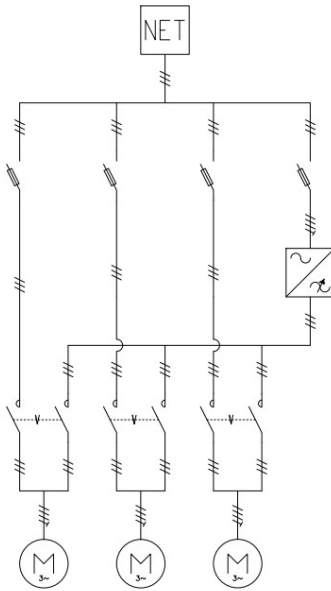
La alternación de motores consiste en contar con dos o más motores por lo general iguales para realizar la misma tarea usando uno solo a la vez. Con esto se gana una mayor confiabilidad ya que no se depende de un solo motor. Este tipo de sistemas se utiliza principalmente en aplicaciones de bombeo. Para este caso se debe procurar utilizar las bombas por un lapso uniforme para asegurar que el desgaste sea parejo en todas. No se deben dejar bombas como backup sin utilizarlas ya que esto genera deterioro en ellas.

A diferencia del sistema de motores en paralelo para este caso no se requiere de protecciones entre el variador y el motor ya que al manejarse de a un solo motor a la vez el variador puede realizar la protección de este. Sin embargo, si se debe usar un contactor para conmutar cada motor. En la Figura 80 se observa el esquema unifilar de un sistema de alternación de dos motores.

**Figura 80***Sistema de alternación de motores**Fuente. Autoría propia****Variador Usado Solo para Arranque de Motores***

Otro caso en el que se usa un solo variador para arrancar varios motores es cuando se tiene una baja capacidad de sobrecarga en la red y el arranque de un motor se realiza por medio de un variador de frecuencia. Cuando la rampa de arranque llega a un valor cercano al de la frecuencia de la red se realiza un proceso de sincronismo de fase y frecuencia para que el motor pase de estar alimentado por el variador a ser alimentado por la red. El sistema de sincronismo debe ser integrado por el fabricante del variador de frecuencia en su equipo ya que este debe actuar directamente sobre la conmutación de los IGBTs para lograr que la salida tenga la misma fase y frecuencia que la red.

Estos sistemas pueden involucrar varios motores y un solo variador que servirá para arrancar de a un motor a la vez como lo muestra la Figura 81. Si el proceso lo amerita el variador también se puede encargar de la detención de los motores, por ejemplo, en un sistema de bombeo el detener el motor desconectándolo de la red produce un golpe de ariete que puede averiar el sistema hidráulico, mientras que si el motor se detiene por medio de una rampa de desaceleración apropiada por medio del variador de frecuencia no existirá el golpe de ariete y se garantizará el buen estado de la instalación hidráulica.

**Figura 81***Arranque de motores por variador de frecuencia**Fuente. Autoría propia*

La topología que presenta este circuito es muy similar a la de un sistema de bombeo de alternación y adición con un solo variador como el de la Figura 66 izquierda ya que para estos sistemas los arrancadores suaves pueden reemplazarse por arranques directos en potencias bajas.

Este método de arranque de motores presenta la ventaja de una corriente de arranque que puede ser incluso menor que la nominal del motor por lo que no se afectará la red por el arranque de los motores. También tiene la ventaja de ser bastante eficiente ya que después de efectuado el arranque el motor trabaja directamente con la red y se eliminan las pérdidas del variador de frecuencia.

## **Conclusiones**

La implementación de sistemas de variación de velocidad con variación de frecuencia de motores de inducción trifásicos puede ser realizada por la mayor parte de quienes tienen conocimientos básicos de electricidad industrial. Sin embargo, garantizar el correcto funcionamiento y la fiabilidad de este sistema mitigando sus efectos negativos y aprovechando al máximo sus ventajas exige un estudio detallado del tema.

## Recomendaciones

Para lograr realizar un sistema de variación de velocidad exitoso es muy importante leer al detalle la documentación de los equipos que se planean instalar. Esto facilita por un lado realizar la mejor instalación posible de acuerdo con las guías de instalación, así como aprovechar al máximo las funciones de programación del variador de frecuencia que en muchos casos pueden evitar el uso de componentes externos como PLCs o instrumentos y simplificar considerablemente el sistema.

Un banco de pruebas de variadores de frecuencia y motores de inducción puede servir dotado con instrumentos de medición es muy útil para realizar múltiples experimentos y mediciones que pueden servir para mejorar el entendimiento de los sistemas de variación de velocidad ya que se pueden recrear condiciones que no son tan fáciles de encontrar en la industria o para realizar pruebas que no se pueden hacer dentro de las plantas industriales por ser necesario detener un proceso para poder realizarlas.

Es muy importante también investigar sobre los motores de imán permanente y los de reluctancia síncronos ya que, aunque actualmente se usan muy poco, en un mediano plazo se implementaran mucho más debido a las ventajas que poseen sobre el motor de inducción y a que su desarrollo permitirá la reducción de sus costos de fabricación.

## Referencias

- A. Vernavá, R. G. (2008). Control vectorial del motor asincronico (SVM - FOC). Rosario:  
Universidad Nacional de Rosario.
- ABB. (2011). Los motores que vienen. *Revista ABB 1|11 [Archivo PDF]*, 56-61.  
[https://library.e.abb.com/public/a9b1dc36a93a150bc12578540041b292/Revista%20ABB%201-2011\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/a9b1dc36a93a150bc12578540041b292/Revista%20ABB%201-2011_72dpi.pdf)
- ABB. (2011. 2p). *Technical note IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors [Archivo PDF]*.  
[https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018\\_20848\\_ABB\\_Technical\\_note\\_IEC\\_60034\\_30\\_1.pdf](https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf)
- ABB. (2014). *Drive ABB para bombeo solar ACS355 + N827 Guía de selección de equipos [Archivo PDF]*. ABB Group.  
[https://library.e.abb.com/public/5c92a1f510033c5fc1257d9d0043f83a/ACS355\\_SOLAR\\_GUIA\\_ES.pdf](https://library.e.abb.com/public/5c92a1f510033c5fc1257d9d0043f83a/ACS355_SOLAR_GUIA_ES.pdf)
- ABB. (09 de 09 de 2014). *Libro de guías Técnicas de accionamientos de CA [Archivo PDF]*.  
ABB Library:  
[https://library.e.abb.com/public/dd0c813e2011033ec1257d4e00406241/TechnicalGuideBook\\_1\\_10\\_ES\\_REVH.pdf](https://library.e.abb.com/public/dd0c813e2011033ec1257d4e00406241/TechnicalGuideBook_1_10_ES_REVH.pdf)
- ABB. (2014. 131p). *Guía del motor: Información técnica básica de motores de inducción de baja tensión [Archivo PDF]*. Bramley: WYBO Haas & Tomczak.  
[https://www.motronic.es/upfiles/productes\\_img/files/motores-abb-m3kp-ie2-antideflagrantes-caja-de-seguridad-aumentada-ex-de-iib-t4-certificado-atex-es\\_5538.pdf](https://www.motronic.es/upfiles/productes_img/files/motores-abb-m3kp-ie2-antideflagrantes-caja-de-seguridad-aumentada-ex-de-iib-t4-certificado-atex-es_5538.pdf)



ABB. (2016). *DTC: una técnica de control de motores para todas las estaciones [Archivo PDF]*.

Zurich: ABB Library.

[https://library.e.abb.com/public/b94aa816ef2c48cb8ea3d9c8b740fc75/ABB\\_WhitePaper\\_DTCMotor\\_ES\\_3AUA000019548.pdf](https://library.e.abb.com/public/b94aa816ef2c48cb8ea3d9c8b740fc75/ABB_WhitePaper_DTCMotor_ES_3AUA000019548.pdf)

ABB. (2016). *Seguridad funcional basada en convertidores [Archivo PDF]*.

[https://library.e.abb.com/public/bedb10857e2d4717ae0416893a9dc402/ABB\\_WhitePaper\\_DriveBased\\_ES\\_3AUA0000195481.pdf](https://library.e.abb.com/public/bedb10857e2d4717ae0416893a9dc402/ABB_WhitePaper_DriveBased_ES_3AUA0000195481.pdf)

Acero, E. B. (2012). *Análisis de la sobretensión transitoria en variadores de velocidad [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes, Archivo PDF]*. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/24896/u619150.pdf?sequence=1>

Allen Bradley. (2010. 120p.). *Pautas de cableado y conexión a tierra para variadores de CA con modulación de impulsos en anchura (PWM) [Archivo PDF]*.

[https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/drives-in001\\_-es-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/drives-in001_-es-p.pdf)

Allen Bradley. (2016). *Uso de disyuntores de protección de motores con variadores de frecuencia variable [archivo PDF]*. Milwaukee: Rockwell Automation, Inc.

[https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/140m-at002\\_-es-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/140m-at002_-es-p.pdf)

Anaheim Automation. (2017). *Anaheim Automation [Archivo PDF]*. Retrieved 10 23, 2017,

from IP, NEMA and UL Rating Codes:

<https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/NEMA,%20UL,%20and%20IP%20Rating%20Codes.pdf>

BALDOR-RELIANCE. (2017, 04 26). *Baldor AC Motors*. Retrieved from Baldor a member of the ABB group: <http://www.baldor.com/brands/baldor-reliance/products/motors/ac-motors>

Belden. (2020). *Variable frequency drive (VFD) cable solutions [Archivo PDF]*. Belden Inc. <https://www.belden.com/dfsmedia/f1e38517e0cd4caa8b1acb6619890f5e/7443-source/variable-frequency-drive-cable-belden-2019-03>

Bhag S, G., & Huseyn R, H. (2002. 699p). *Máquinas eléctricas y transformadores. 3 ed.* Mexico D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de CV.

Bueno, A. (2019). *Electrónica de potencia: Aspectos Generales y Convertidores Electrónicos [Archivo PDF]*. Caracas: UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR. <https://sites.google.com/a/usb.ve/bueno/home/Monografas-y-Guas>

CHAPMAN, S. J. (2015. 502p). *Máquinas eléctricas Quinta edición. 5 ed.* México D.F.: McGraw Hill.

Chipman, R. A. (1971). *Líneas de transmisión*. Ciudad de México: McGraw-Hill.

Danfoss. (1999). *VLT 6000 Adjustable Frequency Drive [Archivo PDF]*. Nordborg: Danfoss. [https://esys.us/pdf/danfoss/vlt6000\\_description.pdf](https://esys.us/pdf/danfoss/vlt6000_description.pdf)

DANFOSS. (2014. 180p). *Facts Worth Knowing about Frequency Converters [Archivo PDF]*. Ulsnaes. <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/>

- Danfoss. (2017. 252p). *Guía de diseño VLT Automation Drive FC 302 315-1200kW [Archivo PDF]*. <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG34S305.pdf>
- Danfoss. (2019). *Facts Worth Knowing about AC Drives [Archivo PDF]*. Nordborg: PE-MSMBM/ColorSigns.  
[https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPM403A402\\_FWK.pdf](https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPM403A402_FWK.pdf)
- Danfoss. (2020). *Guía de selección AQUA Drive FC 202 0,25 kW – 1,4 MW [Archivo PDF]*. Nordborg.  
[https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPB202A805\\_FC200\\_SG\\_LR.pdf](https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPB202A805_FC200_SG_LR.pdf)
- EATON. (2017). *EMC and Variable Speed Drives [Archivo PDF]*. Cleveland: EATON.  
<https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/ap040179en.pdf>
- Eaton. (2022). *ACE10 Explosionproof Variable Frequency Drives*. Recuperado el 11 de Octubre de 2022, de Eaton Powering Business Worldwide: <https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/industrial-control--drives--automation---sensors/ace10-series-explosionproof-variable-frequency-drives.html>
- Fluke. (2020). *Analizadores de motor de la serie MDA-550 y MDA-510 de Fluke*. (Fluke Corporation) Recuperado el 02 de 04 de 2020, de <https://www.fluke.com/es-co/producto/comprobacion-electrica/osciloscopios-portatiles/mda-500-series>
- Franco Franco, J. D., & Echeverry Muñetonez, J. N. (2018). *Presencia de armónicos en redes de baja tensión [Tesis de pregrado, Archivo PDF]*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/91a22aa5-40c6-4e1a-b1cf-1bf9eb9ef7b8/content>

IEEE. (2004). *IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators*.  
New York: IEEE Power engineering society.

Khan Academy. (2020). *Inercia rotacional*. Recuperado el 01 de Marzo de 2020, de Khan Academy: <https://es.khanacademy.org/science/physics/torque-angular-momentum/torque-tutorial/a/rotational-inertia>

Khan, S. (2008. 455p). *Industrial Power Systems*. Boca Raton: CRC Press.

Littelfuse, Inc. (2016). *Ground-Fault Protection with VFDs [Archivo PDF]*.  
[https://m.littelfuse.com/~media/protection-relays/white-papers/littelfuse\\_white\\_paper\\_ground\\_fault\\_el731.pdf](https://m.littelfuse.com/~media/protection-relays/white-papers/littelfuse_white_paper_ground_fault_el731.pdf)

López, W. M. (2015). Caracterización de corrientes de rodamientos en motores de inducción de Jaula de Ardilla alimentados por variadores de velocidad, [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Archivo PDF]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.  
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/53789/1018422900.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Marathon motors. (2013. 109p). *Basic training industrial-duty & commercial-duty [Archivo PDF]*. Marathon Motors. <https://engineeringbookspdf.com/basic-training-industrial-duty-and-commercial-duty-electric-motors-gear-reducers-gear-motors-ac-and-dc-drives-pdf-free-download/117/>

Mining technology. (2018). *Vacon*. Recuperado el 15 de Marzo de 2018, de Mining technology: <http://www.mining-technology.com/contractors/power/vacon/>

- Ministerio de Minas y Energía. (2013. 208p). *Reglamento Técnico de Instalaciones Electricas [Archivo PDF]*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.  
[https://www.minenergia.gov.co/documents/3809/Anexo\\_General\\_del\\_RETIE\\_vigente\\_actualizado\\_a\\_2015-1.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/3809/Anexo_General_del_RETIE_vigente_actualizado_a_2015-1.pdf)
- Mora Fraile, J. (2003. 751p). *Máquinas Eléctricas. 5 ed.* Madrid: Mc Graw Hill/Interamericana de España, S.A.U.
- NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. (2009). *NEMA MG-1: Motors and Generators*. Rosslyn: National Electrical Manufacturers Association.
- Obregón, J. E. (2005. 113p). *Medición a la eficiencia a motores de inducción utilizando el método de deslizamiento. [Tesis de maestría Universidad Autónoma de Nuevo León. Archivo PDF]*. San Nicolás de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León.  
<http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150560.PDF>
- Ortega, D. (2006). *Convertidor Matricial CA-CA Tifásico PWM: Simulación e implementación [Tesis de maestría Universidad de Las Américas de Puebla, Archivo PDF]*. Puebla: Universidad de las Americas Puebla.  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/meie/ortega\\_g\\_d/](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/ortega_g_d/)
- Parra López, E. E. (2004). *Análisis de armónicos en sistemas de distribución*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Quintero Sarmiento, D. R., Rosero Gacia, J., & Mejía López, W. (2013). *Medición de corrientes EDM sobre rodamientos en el conjunto motor de inducción y variador de frecuencia [Archivo PDF]*. 9(2).  
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/2639/Medici%c3%b3n%20de%20c>

orrientes%20EDM%20sobre%20rodamientos%20en%20el%20conjunto%20motor%20de  
%20inducci%c3%b3n%20y%20variador%20de%20frecuencia.pdf?sequence=1&isAllow  
ed=y

RASHID, M. (2015. 946p). *Electrónica de Potencia. Traducido por Rodolfo Navarro Salas. 4 ed.* Mexico D.F.: Pearson Education.

Rockwell Automation. (2017). *PowerFlex Dynamic Braking Resistor Calculator [Archivo PDF]*. Milwaukee.

[https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/pflex-at001\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/at/pflex-at001_-en-p.pdf)

Rodríguez Pozueta, M. A. (s.f.). *Frenado de máquinas asíncronas de inducción [Archivo PDF]*. Santander: Universidad de Cantabria.

[https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Frenado%20asincronas\\_Web.pdf](https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Frenado%20asincronas_Web.pdf)

Schaffner. (2019). *DATASHEET 3-Phase Filters FN 3270 Compact EMC/RFI Filter for Industrial Motor Drive Applications [Archivo PDF]*. Schaffner Group.

[https://www.schaffner.com/fileadmin/user\\_upload/pim/products/datasheets/FN3270\\_FN3271.pdf](https://www.schaffner.com/fileadmin/user_upload/pim/products/datasheets/FN3270_FN3271.pdf)

Schneider Electric. (2003. 820p.). *Manual teórico-práctico de Instalaciones en Baja tensión Volumen 1 [Archivo PDF]*. Barcelona: Schneider Electric España, S.A.

[https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Specification+guide&p\\_File\\_Name=600009K03-mtp-voll.pdf&p\\_Doc\\_Ref=600009K03&\\_ga=2.191935662.529800813.1666032643-202378125.1663150407](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Specification+guide&p_File_Name=600009K03-mtp-voll.pdf&p_Doc_Ref=600009K03&_ga=2.191935662.529800813.1666032643-202378125.1663150407)

SCHNEIDER ELECTRIC. (2004. 28p.). *Cuaderno Técnico n°208 Arranadores y variadores de velocidad electrónicos*. Barcelona: Schneider Electric.

Science Direct. (2020). *Science Direct*. Recuperado el 03 de 04 de 2020, de

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/incremental-encoder>

SICK. (2020). *Encoders absolutos*. (SICK AG) Recuperado el 03 de 04 de 2020, de SICK sensor

inteligente: <https://www.sick.com/cl/es/encoders/encoders-absolutos/c/g244395>

SICK. (2020). *Encoders incrementales*. (SICK AG) Recuperado el 03 de 04 de 2020, de Sick

sensor inteligente: [https://www.sick.com/cl/es/encoders/encoders-](https://www.sick.com/cl/es/encoders/encoders-incrementales/c/g244396)

[incrementales/c/g244396](https://www.sick.com/cl/es/encoders/encoders-incrementales/c/g244396)

TMEIC. (2011). *Medium voltage drive evolution [Archivo PDF]*. TMEIC Corporation.

<https://www.tmeic.com/sites/default/files/assets/files/library/MV%20Drive%20Evolution%20Brochure-2019web.pdf>

WEG. (2012). *Specification of Electric Motors [Archivo PDF]*. WEG:

<http://www.weg.kiev.ua/pdf/WEG-specification-of-electric-motors-manual-en.pdf>

WEG. (s.f.). *Selección de motores eléctricos*. WEG:

[https://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_sel\\_web.asp](https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp)

YASKAWA. (2005). *Motor Bearing Current Phenomenon and 3-Level Inverter Technology*

*[Archivo PDF]*. Waukegan: Yaskawa Electric America.

<https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=AN.G7.02&cmd=documents&documentName=AN.G7.02.pdf>

Yusta, J. M., Dufo, R., & Bernal, J. L. (2011. 413p). *Tecnología eléctrica*. Zaragoza: Prensa  
Universitas de Zaragoza.



## Apéndices

### Apéndice A

*Valores Mínimos de Factor de Servicio Según Norma NEMA MG-01*

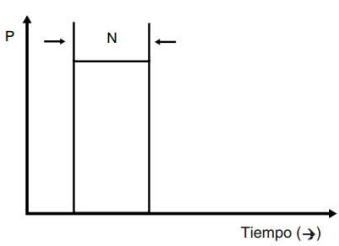
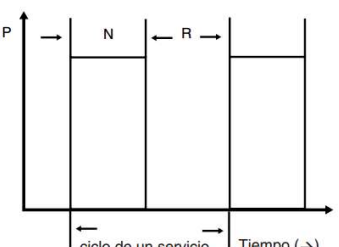
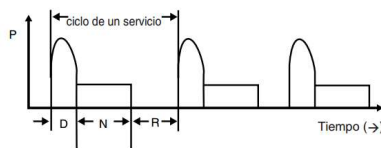
Potencia (HP)	Velocidad síncrona en RPM						
	3600	1800	1200	900	720	600	514
0,05	1,4	1,4	1,4	1,4	-	-	-
0,083	1,4	1,4	1,4	1,4	-	-	-
0,125	1,4	1,4	1,4	1,4	-	-	-
0,166	1,35	1,35	1,35	1,35	-	-	-
0,25	1,35	1,35	1,35	1,35	-	-	-
0,333	1,35	1,35	1,35	1,35	-	-	-
0,5	1,25	1,25	1,25	1,15	-	-	-
0,75	1,25	1,25	1,15	1,15	-	-	-
1	1,25	1,15	1,15	1,15	-	-	-
1,5 a 125	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
150	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
200	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	-	-
250	1	1,15	1,15	1,15	-	-	-
300	1	1,15	1,15	-	-	-	-
350	1	1,15	1,15	-	-	-	-
400	1	1,15	-	-	-	-	-
450	1	1,15	-	-	-	-	-
500	1	1,15	-	-	-	-	-

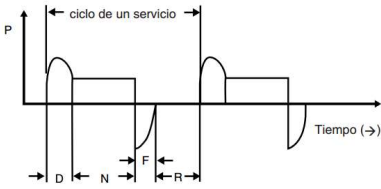
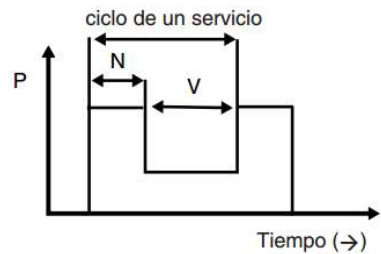
*Nota.* Para motores Jaula de ardilla el factor de servicio 1,15 solo aplica para motores tipo A,B y C

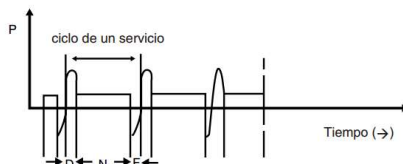
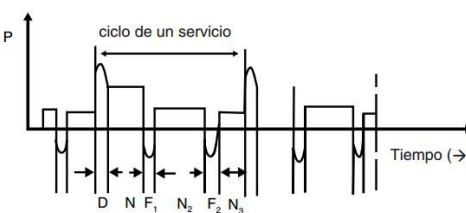
*Fuente:* NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. NEMA MG-1: Motors and Generators. Part 12, p. 11. Rosslyn : National Electrical Manufacturers Association, 2009

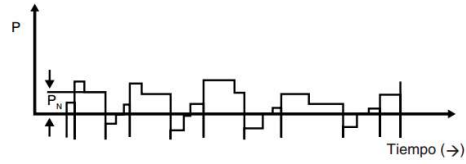
**Apendice B**

*Tipos de Servicio de Motores de Inducción Según Norma IEC 34-1*

Tipo de servicio	Descripción	Designación
<p>S1</p> <p>Servicio en funcionamiento continuo</p>	<p>Funcionamiento a carga constante de duración suficiente para alcanzar el equilibrio térmico.</p>	<p>S1</p> 
<p>S2</p> <p>Servicio de corta duración</p>	<p>Operación a carga constante durante un tiempo determinado, menor del requerido para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un tiempo de reposo en estado desconectado de duración suficiente para permitir que la temperatura del motor vuelva a la temperatura ambiente o a la temperatura del refrigerante. Se recomiendan los valores de 10, 30, 60 y 90 minutos para la duración prevista del ciclo de servicio.</p>	<p>S2 x minutos</p> 
<p>S3</p> <p>Servicio intermitente</p>	<p>Secuencia de ciclos de servicio idénticos, en la que cada uno consta de un período de funcionamiento a carga constante y un período de reposo en estado desconectado. El ciclo de servicio es demasiado corto para alcanzar el equilibrio térmico. La intensidad de arranque no afecta al calentamiento de forma significativa.</p>	<p>S3 x%</p> 

Tipo de servicio	Descripción	Designación
<p>S4</p> <p>Servicio intermitente con arranque</p>	<p>Los valores recomendados para el factor de duración del ciclo son 15, 25, 40 y 60 %. La duración de un ciclo de servicio es de 10 minutos.</p> <p>Secuencia de ciclos de servicio idénticos, en la que cada uno consta de un período de arranque significativo, un período de funcionamiento a carga constante y un período de reposo en estado desconectado.</p> <p>El tiempo del ciclo es demasiado corto para alcanzar el equilibrio térmico. En este tipo de servicio el motor es llevado al estado de reposo por la carga o por el frenado mecánico, por lo que el motor no se carga térmicamente.</p> <p>Para definir completamente el tipo de servicio son necesarios los siguientes parámetros: el factor de duración del ciclo, el número de ciclos de servicio por hora (c/h), el momento de inercia de la carga <math>J_L</math> y el momento de inercia del motor <math>J_M</math>.</p>	<p>S4 <math>x\%</math>, y c/h, <math>J_L</math>, <math>J_M</math></p> 
<p>S5</p> <p>Servicio intermitente con arranque y frenado eléctrico</p>	<p>Secuencia de ciclos de servicio idénticos, en la que cada uno de ellos consta de un período de arranque significativo, un período de funcionamiento a carga constante, un período de frenado eléctrico rápido y un período de reposo en estado desconectado.</p> <p>Los ciclos de servicio son demasiado cortos para alcanzar el equilibrio térmico. En este tipo de servicio el motor es llevado al estado de reposo</p>	<p>S5 <math>x\%</math>, y c/h, <math>J_L</math>, <math>J_M</math></p> 

Tipo de servicio	Descripción	Designación
	<p>por la carga o por el frenado mecánico, por lo que el motor no se carga térmicamente.</p> <p>Para definir completamente el tipo de servicio son necesarios los siguientes parámetros: el factor de duración del ciclo, el número de ciclos de servicio por hora (c/h), el momento de inercia de la carga <math>J_L</math> y el momento de inercia del motor <math>J_M</math>.</p>	
<p>S6</p> <p>Servicio periódico con funcionamiento ininterrumpido</p>	<p>Secuencia de ciclos de servicio idénticos, en la que cada uno de ellos consta de un período de carga constante y un período de operación en vacío. Los ciclos de servicio son demasiado cortos para alcanzar el equilibrio térmico.</p> <p>Los valores recomendados para el factor de duración del ciclo son 15, 25, 40 y 60 %. La duración de un ciclo de servicio es de 10 minutos.</p>	<p>S6 x%</p> 
<p>S7</p> <p>Servicio periódico de funcionamiento continuo con frenado eléctrico</p>	<p>Secuencia de ciclos idénticos, en la que cada uno de ellos consta de un período de arranque, un período de funcionamiento a carga constante y un período de frenado. El sistema de frenado es eléctrico, por ejemplo, frenado contracorriente. Los ciclos de servicio son demasiado cortos para alcanzar el equilibrio térmico.</p>	<p>S7, x c/h, <math>J_L</math>, <math>J_M</math></p> 

Tipo de servicio	Descripción	Designación
S8	<p>Para definir completamente el tipo de servicio son necesarios los siguientes parámetros: el número de ciclos de servicio por hora (c/h), el momento de inercia de la carga <math>J_L</math> y el momento de inercia del motor <math>J_M</math>.</p> <p>Secuencia de ciclos de servicio idénticos, en la que cada uno de ellos consta de un período de arranque, un período de funcionamiento a carga constante, que corresponde a una velocidad predeterminada, seguido por uno o más períodos de funcionamiento con diferentes cargas constantes correspondientes a velocidades distintas. No hay período de reposo en estado desconectado.</p>	
<p>Servicio periódico ininterrumpido con variaciones de carga y de velocidad</p>	<p>Los ciclos de servicio son demasiado cortos para alcanzar el equilibrio térmico.</p> <p>Este tipo de servicio se utiliza, por ejemplo, en motores de polos conmutables.</p> <p>Para definir completamente el tipo de servicio son necesarios los siguientes parámetros: el número de ciclos de servicio por hora (c/h), el momento de inercia de la carga <math>J_L</math> y el momento de inercia del motor <math>J_M</math>, la carga, la velocidad y el factor de duración del ciclo para cada velocidad de rotación.</p>	<p>S8, x c/h, <math>J_L</math>, <math>J_M</math></p> 

Tipo de servicio	Descripción	Designación
S9	Servicio en el cual, generalmente, la carga y la velocidad tienen una	
Servicio con	variación no periódica dentro del margen de funcionamiento permitido.	
variaciones no	Este servicio presenta con frecuencia sobrecargas que pueden exceder	S9
periódicas de la	ampliamente los valores en plena carga. Para este tipo de servicio, el	
carga y de la	concepto de sobrecarga debería basarse en valores adecuados de plena	
velocidad	carga.	

*Fuente.* ABB. (2014. 131p). Guía del motor: Información técnica básica de motores de inducción de baja tensión. (p. 56), [Archivo PDF]. Bramley: WYBO Haas & Tomczak. [https://www.motronic.es/upfiles/productes\\_img/files/motores-abb-m3kp-ie2-antideflagrantes-caja-de-seguridad-aumentada-ex-de-iib-t4-certificado-atex-es\\_5538.pdf](https://www.motronic.es/upfiles/productes_img/files/motores-abb-m3kp-ie2-antideflagrantes-caja-de-seguridad-aumentada-ex-de-iib-t4-certificado-atex-es_5538.pdf)

## Apéndice C

### *Clases de Pérdidas en Motores de Inducción*

Tipo de pérdida	Porcentaje del total de pérdidas	Descripción	Dependencia con respecto a la carga	Forma de reducción
En el núcleo	15-25%	Energía requerida para magnetizar el núcleo.	Fija	Mejorando la permeabilidad del acero (silicio) usando laminaciones más delgadas, modificando la longitud del núcleo
Fricción y ventilación	5-15%	Pérdidas debidas a la fricción de las chumaceras y a la resistencia del aire, las cuales se producen en primer lugar por el ventilador.	Fija	Usando chumaceras de baja fricción y mejorando el diseño de los ventiladores
En el devanado de estator	25-40%	Calentamiento debido al flujo de corriente (I) a través de la resistencia (R) del devanado del estator. También se conoce como $RI^2$ .	Variable	Aumentando el volumen del cobre en el devanado del estator, mejorando el diseño de las ranuras y usando un aislamiento más delgado

En el rotor	15-25%	Calentamiento debido a las pérdidas $RI^2$ en la barra del rotor.	Variable	Aumentando el tamaño de las barras conductoras del rotor y anillos terminales
Dispares	10-20%	Flujo disperso inducido por las corrientes de cargas y otras corrientes menores,	Variable	Mejorando varios detalles en el diseño y manufactura

---

*Fuente.* Obregón, J. E. (2005. 113p). Medición a la eficiencia a motores de inducción utilizando el método de deslizamiento. [Tesis de maestría Universidad Autónoma de Nuevo León. Archivo PDF]. p. 38. San Nicolás de los Garza: Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020150560.PDF>



## Apéndice D

### *Métodos para Hallar la Eficiencia Energética de los Motores de Inducción*




Método	Descripción
A	Entrada – Salida
B	Entrada – Salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales
B1	Entrada – Salida con segregación de pérdidas, medición indirecta de las pérdidas adicionales y una temperatura asumida
C	Método de las máquinas duplicadas con segregación de pérdidas y medición indirecta de pérdidas adicionales
E	Medición de potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y medición directa de las pérdidas adicionales
E1	Medición de potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y asumiendo el valor de las pérdidas adicionales
F	Circuito equivalente con medición directa de las pérdidas adicionales
F1	Circuito equivalente asumiendo el valor de las pérdidas adicionales
C/F	Circuito equivalente calibrado por punto de carga del método C con medición indirecta de pérdidas adicionales
E/F	Circuito equivalente calibrado por punto de carga del método E con medición directa de pérdidas adicionales
E1/F1	Circuito equivalente calibrado por punto de carga del método E asumiendo el valor de pérdidas adicionales

*Nota:* El método B es el más común.

*Fuente:* IEEE. (2004). IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators. p. 34. New York: IEEE Power engineering society.

## Apéndice E

### Comparación de Motores de Iguales Características y Distintos Niveles de Eficiencia

Parámetro	Motor		
	W22 IE1 10 HP 4P 132S 3F 220/440 V 60 Hz IC411 - TEFC - B3L(D)	W22 IE2 10 HP 4P 132S 3F 220/440 V 60 Hz IC411 - TEFC - B3L(D)	W22 IE3 10 HP 4P 132S 3F 220/440 V 60 Hz IC411 - TEFC - B3L(D)
Imagen			
Carcasa	132S	132S	132S
Material de la carcasa	Hierro fundido	Hierro fundido	Hierro fundido
Potencia	7.5 kW (10 HP)	7.5 kW (10 HP)	7.5 kW (10 HP)
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Rendimiento (100% carga)	87.5	91.0	92.0
Factor de potencia (100% carga)	0.83	0.84	0.84
Rotación nominal	1760 rpm	1760 rpm	1765 rpm
Resbalamiento	2.22 %	2.22 %	1.94 %
Tensión nominal	220/440 V	220/440 V	220/440 V
Corriente nominal	27.2/13.6 A	25.8/12.9 A	25.4/12.7 A
Corriente de arranque	196/97.9 A	204/102 A	208/104 A
Ip/In	7.2	7.9	8.2
Corriente en vacío	11.8/5.90 A	12.2/6.10 A	12.0/6.00 A
Torque nominal	4.15 kgfm	30.0 ft.lb	29.9 ft.lb
Torque de arranque	200 %	200 %	229 %
Torque máximo	280 %	320 %	350 %
Tiempo de rotor bloqueado	14s (frío) 8s (caliente)	21s (frío) 12s (caliente)	23s (frío) 13s (caliente)
Momento de inercia (J)	0.0528 kgm²	1.16 sq.ft.lb	1.34 sq.ft.lb
Categoría	N	N	N
Clase de aislamiento	F	F	F
Factor de servicio	1.15	1.15	1.25
Ciclo de servicio	S1	S1	S1
Método de partida	Partida directa	Partida directa	Partida directa
Temperatura ambiente	-20°C hasta 40°C	-20°C hasta +40°C	-20°C hasta +40°C
Altitud	1000 m	1000 m	1000 m
Grado de protección	IP55	IP55	IP55
Refrigeración	IC411 - TEFC	IC411 - TEFC	IC411 - TEFC
Forma constructiva	B3L(D)	B3L(D)	B3L(D)
Dirección de rotación <sup>1</sup>	Ambos	Ambos	Ambos
Nivel de Ruido <sup>2</sup>	61.0 dB(A)	58.0 dB(A)	58.0 dB(A)
Masa aproximada <sup>3</sup>	69.0 kg	147 lb	158 lb
Pintura	RAL 5009 207A (ISO 12944 - C2)	RAL 5009 207A (ISO 12944 - C2)	RAL 6002 207A (ISO 12944 - C2)
Brida	Sin	Sin	Sin
Tipo de cojinete	6308 ZZ	6308 ZZ	6308 ZZ
Cojinete LNA	6207 ZZ	6207 ZZ	6207 ZZ

Fuente. Adaptado de: WEG. (s.f.). Selección de motores eléctricos. WEG:

[https://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_sel\\_web.asp](https://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp)

**Apéndice F**

*Valores de Límite de Eficiencia Según la Norma IEC*

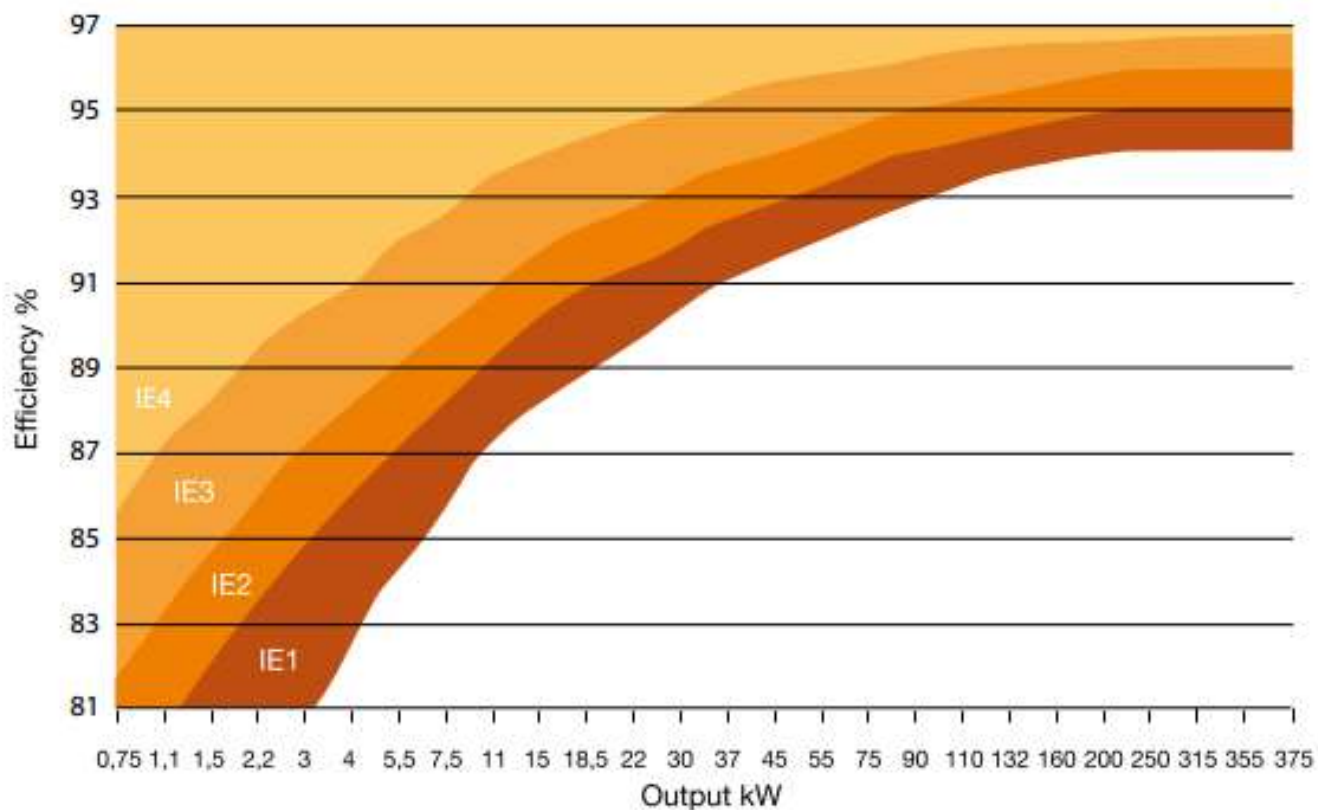
Potencia		IE-1 - Standard efficiency						IE2 - High efficiency						IE3 - Premium efficiency					
		2 polos		4 polos		6 polos		2 polos		4 polos		6 polos		2 polos		4 polos		6 polos	
KW	HP	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz
0,75	1	72,1	77	72,1	78	70	73	77,4	75,5	79,6	82,5	75,9	80	80,7	77	82,5	85,5	78,9	82,5
1,1	1,5	75	78,5	75	79	72,9	75	79,6	82,5	81,4	84	78,1	85,5	82,7	84	84,1	86,5	81	87,5
1,5	2	77,2	81	77,2	81,5	75,2	77	81,3	84	82,8	84	79,8	86,5	84,2	85,5	85,3	86,5	82,5	88,5
2,2	3	79,7	81,5	79,7	83	77,7	78,5	83,2	85,5	84,3	87,5	81,8	87,5	85,9	86,5	86,7	89,5	84,3	89,5
3	-	81,5	-	81,5	-	79,7	-	84,6	-	85,5	-	83,3	-	87,1	-	87,7	-	85,6	-
3,7	5	-	84,5	-	85	-	83,5	-	87,5	-	87,5	-	87,5	-	88,5	-	89,5	-	89,5
4	-	-	83,1	-	83,1	-	81,4	85,8	-	86,6	-	84,6	-	88,1	-	88,6	-	86,8	-
5,5	7,5	84,7	86	84,7	87	83,1	85	87	88,5	87,7	89,5	86	89,5	89,2	89,5	89,6	91,7	88	91
7,5	10	86	87,5	86	87,5	84,7	86	88,1	89,5	88,7	89,5	87,2	89,5	90,1	90,2	90,4	91,7	89,1	91
11	15	87,6	87,5	87,6	88,5	86,4	89	89,4	90,2	89,8	91	88,7	90,2	91,2	91	91,4	92,4	90,3	91,7
15	20	88,7	88,5	88,7	89,5	87,7	89,5	90,3	90,2	90,6	91	89,7	90,2	91,9	91	92,1	93	91,2	91,7
18,5	25	89,3	89,5	89,3	90,5	88,6	90,2	90,9	91	91,2	92,4	90,4	91,7	92,4	91,7	92,6	93,6	91,7	93
22	30	89,9	89,5	89,9	91	89,2	91	91,3	91	91,6	92,4	90,9	91,7	92,7	91,7	93	93,6	92,2	93
30	40	90,7	90,2	90,7	91,7	90,2	91,7	92	91,7	92,3	93	91,7	93	93,3	92,4	93,6	94,1	92,9	94,1
37	50	91,2	91,5	91,2	92,4	90,8	91,7	92,5	92,4	92,7	93	92,2	93	93,7	93	93,9	94,5	93,3	94,1
45	60	91,7	91,7	91,7	93	91,4	91,7	92,9	93	93,1	93,6	92,7	93,6	94	93,6	94,2	95	93,7	94,5
55	75	92,1	92,4	92,1	93	91,9	92,1	93,2	93	93,5	94,1	93,1	93,6	94,3	93,6	94,6	95,4	94,1	94,5
75	100	92,7	93	92,7	93,2	92,6	93	93,8	93,6	94	94,5	93,7	94,1	94,7	94,1	95	95,4	94,6	95
90	125	93	93	93	93,2	92,9	93	94,1	94,5	94,2	94,5	94	94,1	95	95	95,2	95,4	94,9	95
110	150	93,3	93	93,3	93,5	93,3	94,1	94,3	94,5	94,5	95	94,3	95	95,2	95	95,4	95,8	95,1	95,8
132	-	93,5	-	93,5	-	93,5	-	94,6	-	94,7	-	94,6	-	95,4	-	95,6	-	95,4	-
150	200	-	94,1	-	94,5	-	94,1	-	95	-	95	-	95	-	95,4	-	96,2	-	95,8
160	-	93,8	-	93,8	-	93,8	-	94,8	-	94,9	-	94,8	-	95,6	-	95,8	-	95,6	-
185	250	-	94,1	-	94,5	-	94,1	-	95,4	-	95,4	-	95	-	95,8	-	96,2	-	95,8
200	-	94	-	94	-	94	-	95	-	95,1	-	95	-	95,8	-	96	-	95,8	-
220	300	94	94,1	94	94,5	94	94,1	95	95,4	95,1	95,4	95	95	95,8	95,8	96	96,2	95,8	95,8
250	350	94	94,1	94	94,5	94	94,1	95	95,4	95,1	95,4	95	95	95,8	95,8	96	96,2	95,8	95,8
300	400	94	94,1	94	94,5	94	94,1	95	95,4	95,1	95,4	95	95	95,8	95,8	96	96,2	95,8	95,8
330	450	94	94,1	94	94,5	94	94,1	95	95,4	95,1	95,4	95	95	95,8	95,8	96	96,2	95,8	95,8
375	500	94	94,1	94	94,5	94	94,1	95	95,4	95,1	95,4	95	95	95,8	95,8	96	96,2	95,8	95,8

Fuente. ABB. Technical note IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors. 2011. p. 3. [Archivo PDF].

[https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018\\_20848\\_ABB\\_Technical\\_note\\_IEC\\_60034\\_30\\_1.pdf](https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005-2018_20848_ABB_Technical_note_IEC_60034_30_1.pdf)

## Apéndice G

### Clases de Eficiencia para Motores de Cuatro Polos a 50 Hz



*Fuente.* ABB. Technical note IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors. 2011. p. 2.

[Archivo PDF].

<https://library.e.abb.com/public/db64d153e3c346938e18916e66fb1d0d/9AKK107319%20EN%2005->

2018\_20848\_ABB\_Technical\_note\_IEC\_60034\_30\_1.pdf

## Apéndice H

### Grados de Protección IP

	1er dígito Protección contra sólidos	2do dígito Protección contra líquidos	3er dígito Protección contra impactos mecánicos
0	Sin Protección	Sin Protección	Sin Protección
1	Protegido contra objetos sólidos de más de 50 mm	Protegido contra gotas de condensación	Protegido contra impactos de menos de 0.225 julios
2	Protegido contra objetos sólidos de más de 12 mm	Protegido contra rocíos directos de hasta 15° de la vertical	Protegido contra impactos de menos de 0.375 julios
3	Protegido contra objetos sólidos de más de 2.5 mm	Protegido contra rocíos directos de hasta 60° de la vertical	Protegido contra impactos de menos de 0.5 julios
4	Protegido contra objetos sólidos de más de 1mm	Protegido contra rocíos directos en cualquier dirección	Protegido contra impactos de menos de 2.0 julios
5	Protegido limitada mente contra polvo	Protegido contra chorros de agua a baja presión en cualquier dirección	Protegido contra impactos de menos de 6.0 julios
6	Totalmente protegido contra polvo	Protegido contra chorros fuertes de agua en cualquier dirección	Protegido contra impactos de menos de 20.0 julios
7		Protegido contra los efectos de la inmersión de 15 cm a 1m	
8		Protegido contra largos periodos de inmersión bajo una presión especificada	
69K	Protegido contra chorros de agua a presiones y temperaturas elevadas (Definido en norma 40050-9)		

*Fuente.* Anaheim Automation. (2017). Anaheim Automation [Archivo PDF]. Retrieved 10 23, 2017, from IP, NEMA and UL Rating Codes:

<https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/NEMA,%20UL,%20and%20IP%20Rating%20Codes.pdf>

## Apéndice I

### *Principales Tipos de Protecciones Según Norma NEMA*

Tipo	Descripción
1	Para propósitos generales sin sellamiento contra polvo aceite y agua. Brinda protección únicamente contra contacto de objetos y personal
3R	Para uso en exteriores. Sellado contra la lluvia, nieve y hielo
3S	Para uso en exteriores. Sellado contra lluvia, granizo y polvo
4	Sellado contra agua presurizada y polvo
4X	Sellado contra agua, polvo y protegido contra corrosión. Generalmente de acero inoxidable o plásticos resistentes
6P	Protegido contra entrada de agua durante sumersiones prolongadas a una profundidad limitada
12	Se usa principalmente en interiores en tableros de control. Su principal finalidad es proveer contra polvo y líquidos como aceites o refrigerantes
13	Se usa en interiores para proteger contra polvo, rocío de agua, aceite y refrigerante no corrosivo

*Fuente.* Anaheim Automation. (2017). Anaheim Automation [Archivo PDF]. Retrieved 10 23, 2017, from IP,

NEMA and UL Rating Codes:

<https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/NEMA,%20UL,%20and%20IP%20Rating%20Codes.pdf>

## Apéndice J

### *Nomenclatura IC*

Disposición del circuito		Refrigerante primario		Método de movimiento del refrigerante primario	
0	Circulación libre	A	Aire	1	Convección libre
1	Tubo de admisión o conducto de admisión	F	Fluido refrigerante	2-4	Auto-circulación
2	Tubo de salida o conducto de salida	H	Hidrógeno	5	Componente independiente integral
3	Tubo de entrada y salida o conducto	N	Nitrógeno	6	Componente independiente montado en la máquina
4	Superficie del bastidor refrigerada	C	Dióxido de carbono	7	Componente independiente e independiente o presión del sistema de enfriamiento
5	Intercambiador de calor integral (utilizando el medio circundante)	W	Agua	8	Desplazamiento relativo
6	Intercambiador de calor integral (utilizando un medio remoto)	U	Aceite	9	Todos los demás componentes
7	Intercambiador de calor integral (utilizando un medio remoto)	S	Cualquier otro tipo de refrigerante		

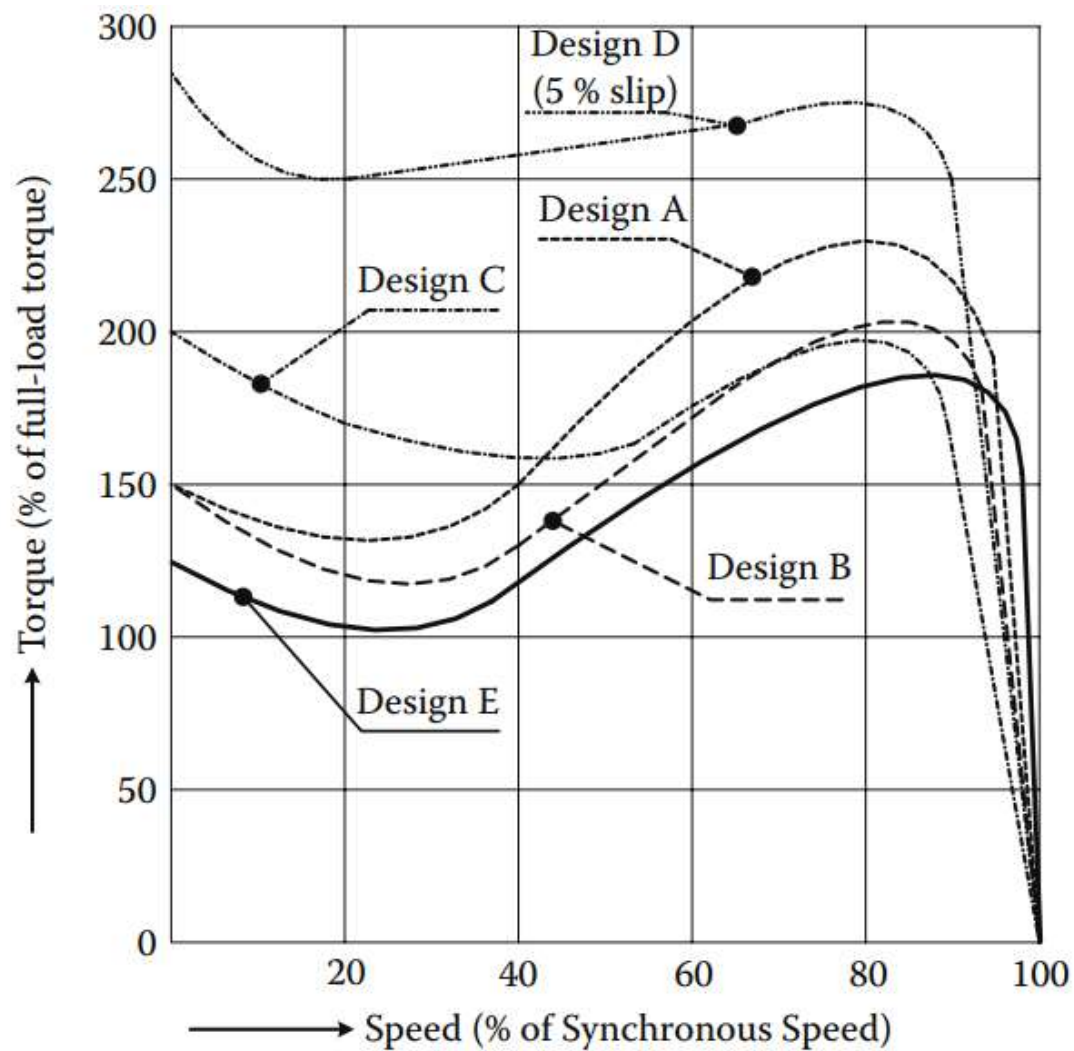


- 8 Intercambiador de calor montado en la máquina (utilizando un medio remoto) Y Refrigerante aun no seleccionado
  - 9 Intercambiador de calor separado (utilizando medios circundantes o remotos)
- 

*Fuente.* NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. NEMA MG-1: Motors and Generators. Part. 6, p. 6-8. Rosslyn : National Electrical Manufacturers Association, 2009

## Apéndice K

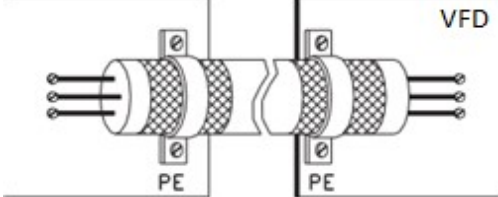
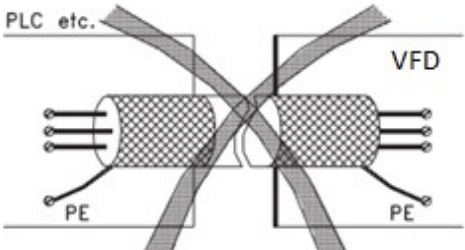
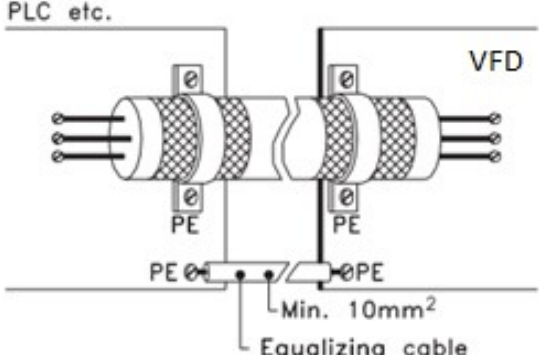
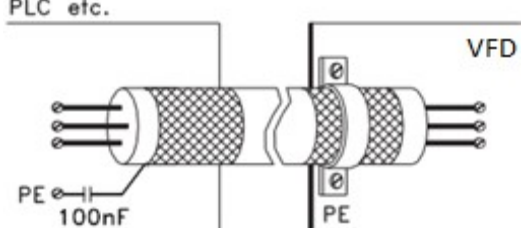
Curvas Típicas de Torque Contra Velocidad en Arranque Directo Según Diseño NEMA

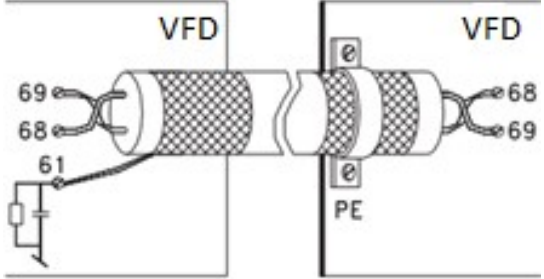


Fuente. Khan, S. (2008. 455p). Industrial Power Systems. p. 201. Boca Raton: CRC Press.

## Apéndice L

### Conexión a Tierra del Apantallamiento de los Cables

Tipo de conexión	Descripción
	<p>Los cables de control y los cables de comunicación serial normalmente deben estar conectados a tierra en ambos extremos.</p>
	<p>Nunca se debe terminar el blindaje a través de un cable flexible.</p>
	<p>Si hay potencial de tierra entre el PLC y la unidad se deben desconectar los cables y medir la tensión con el voltímetro para verificar. Se debe usar un cable de equalización o asegurarse de que las unidades estén atornilladas.</p>
	<p>En casos de bucle de tierra de 50/60 Hz este se debe verificar con la pinza amperimétrica. Para solucionarlo se debe conectar a tierra un extremo a través de un condensador de 100 nF con cables cortos.</p>

Tipo de conexión	Descripción
	<p>Para corrientes de ecualización de potencial en el blindaje del cable de comunicación serial entre dos variadores Se debe conectar un extremo del blindaje al terminal de conexión del blindaje especial con desacoplamiento RC.</p>

*Fuente.* DANFOSS. (2014. 180p). Facts Worth Knowing about Frequency Converters. p. 129. [Archivo PDF].

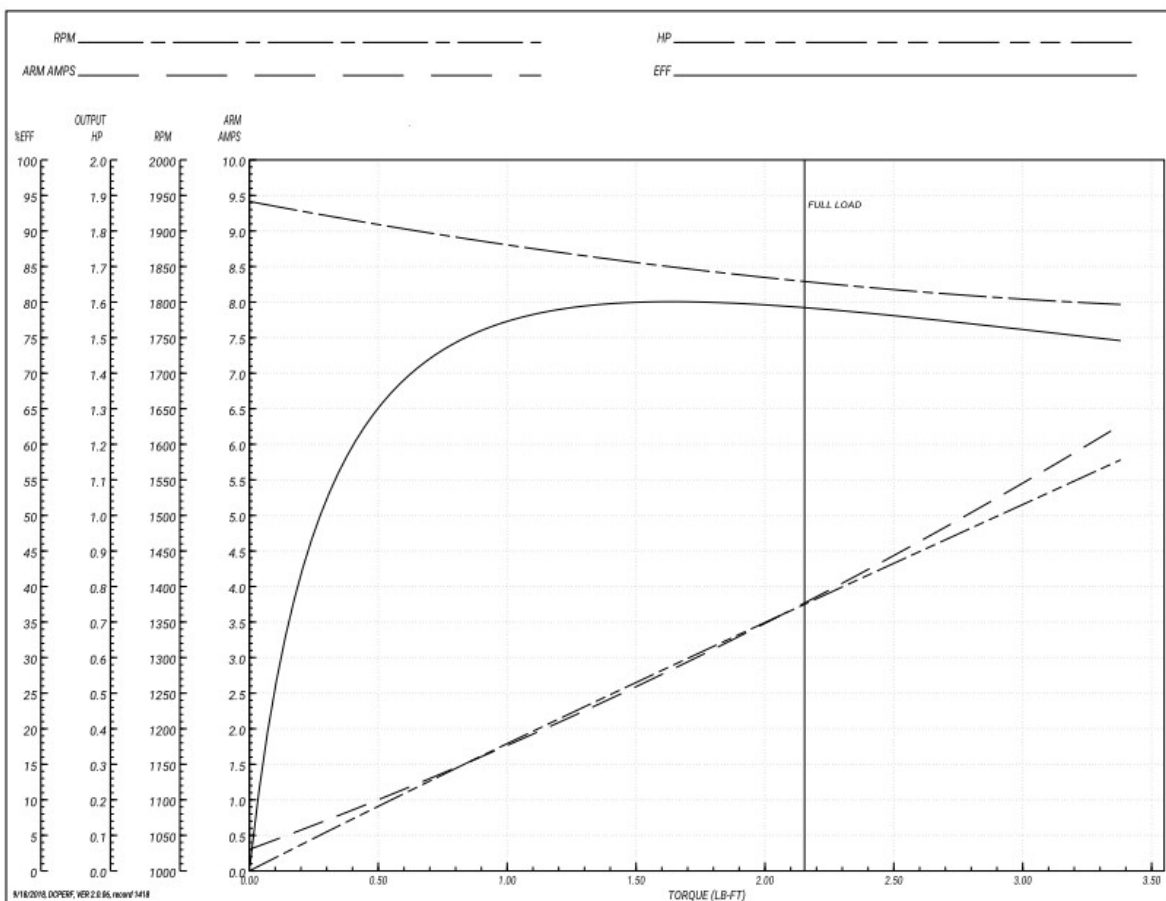
Ulsnaes. <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/FWKComplete/>

## Apéndice M

### Comparación de Motores AC Y DC De 0.75 HP, 1750 RPM

#### Figura M1

Gráfica de comportamiento de motor DC shunt 0.75 HP en condiciones nominales de alimentación

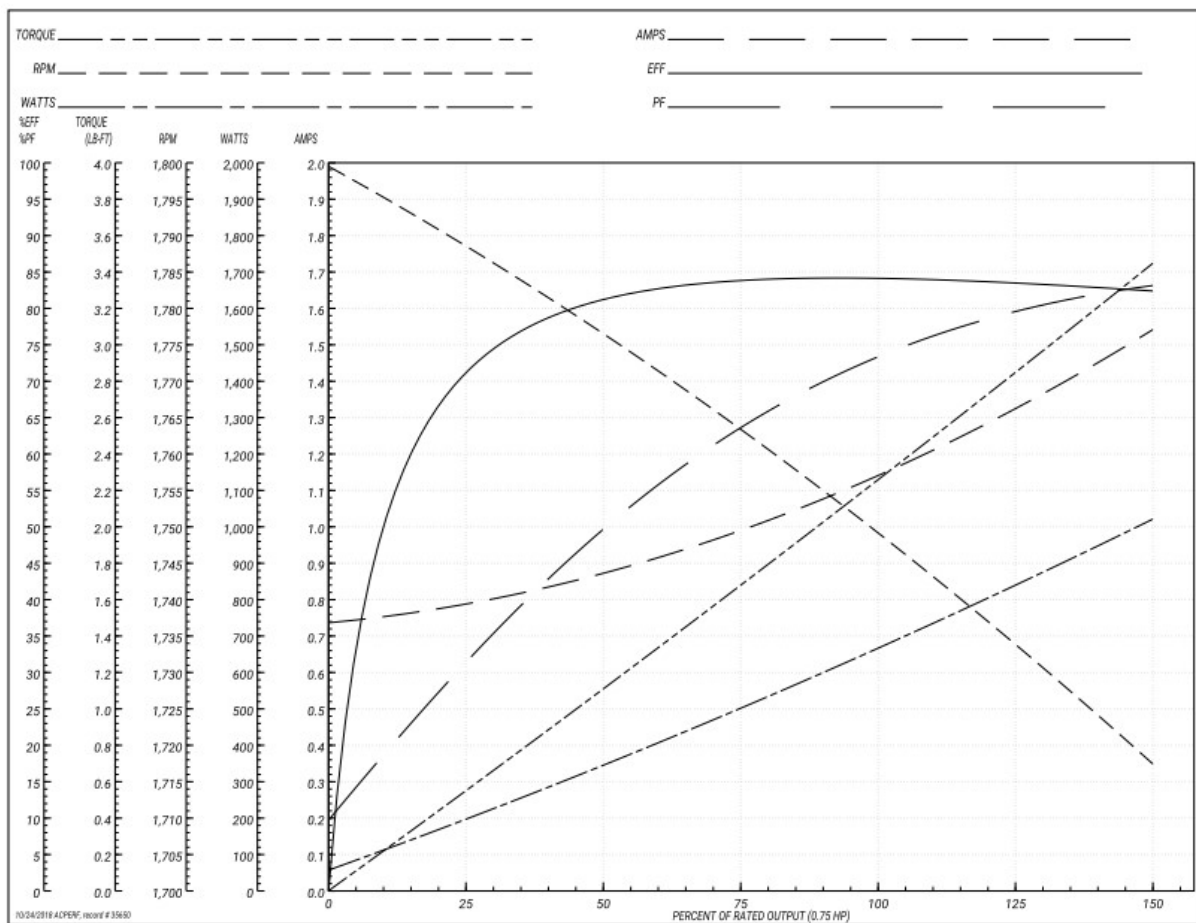


Fuente. Baldor Reliance. Paquete de información de producto CD3476 - MOTOR 3/4, 1750 RPM, NEMA 56C.

2018. 11p.

**Figura M2**

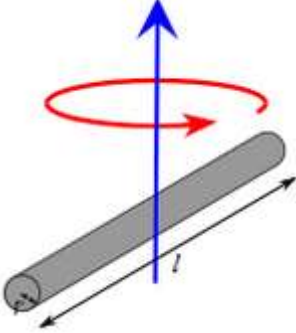
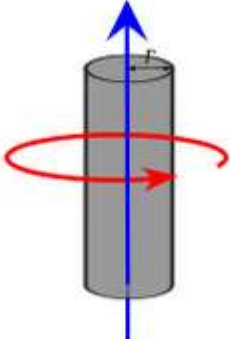
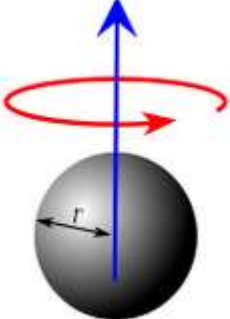
*Gráfica de comportamiento de motor de inducción de 0.75HP en condiciones nominales de alimentación*

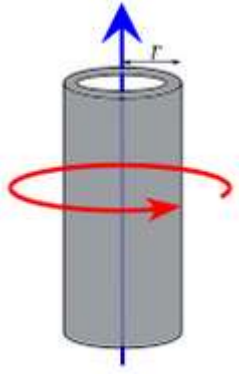
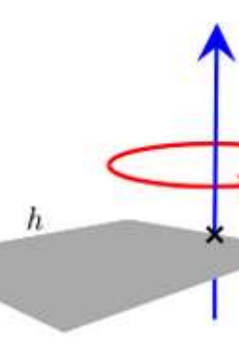
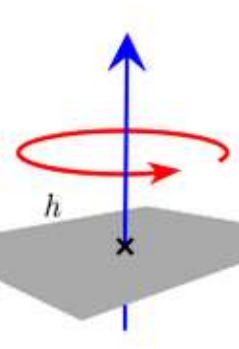


*Fuente.* Baldor Reliance. Paquete de información de producto VEUHM3542 .75HP, 1750RPM, 3PH, 60HZ, 56C, 3516M, TEFC, F3. 2007. 10p.

## Apéndice N

### *Ecuaciones de Inercia Rotacional de Algunos Solidos*

Tipo de solido	Imagen	Ecuación de inercia rotacional
Cilindro alrededor del centro		$J = \frac{1}{12}ml^2 + \frac{1}{4}mr^2$
Cilindro o disco alrededor del eje		$J = \frac{1}{2}mr^2$
Esfera		$J = \frac{2}{5}mr^2$

Tipo de solido	Imagen	Ecuación de inercia rotacional
Cilindro hueco alrededor del eje		$J = mr^2$
Plano con eje de rotación en una orilla		$J = \frac{1}{12}m(4h^2 + w^2)$
Plano alrededor del centro		$J = \frac{1}{12}m(h^2 + w^2)$

*Fuente.* Khan Academy. Inercia rotacional. Khan Academy. [En línea] 2020. [Citado el: 01 de Marzo de 2020.]

<https://es.khanacademy.org/science/physics/torque-angular-momentum/torque-tutorial/a/rotational-inertia>.



## Apéndice O

### *El Convertidor Matricial*

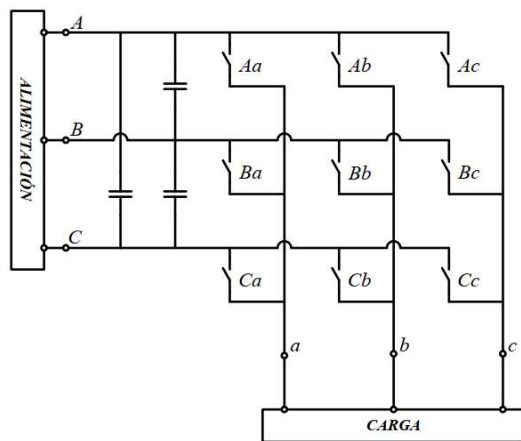
Los variadores de frecuencia de convertidor matricial presentan una topología totalmente distinta a la de los variadores de frecuencia convencionales ya que la conversión es directa sin necesidad de tener un bus DC.

A pesar de que la idea y el desarrollo de un convertidor matricial existe desde hace varios años, solo desde hace poco tiempo se ha empezado a implementar en la industria más exactamente por el fabricante japonés Yaskawa Electric Corporation. Una de las principales limitantes para la implementación de esta tecnología en la industria fue la falta de desarrollo de módulos de potencia con los elementos requeridos ya que se necesita contar con nueve interruptores bidireccionales.

En la Figura O se observa la topología básica de un convertidor matricial. Al contar con nueve interruptores pueden existir 512 combinaciones posibles. Sin embargo, el convertidor matricial cuenta con dos reglas básicas que restringen las combinaciones posibles.

**Figura O**

*Topología del convertidor matricial*



*Fuente. Autoría propia*

La primera regla es que cada línea de salida solo puede estar conectada a una línea de entrada ya que de lo contrario se presentaría un corto circuito.

La segunda regla es que las terminales del motor siempre deben estar conectadas a una línea de entrada ya que se presentaría una sobre tensión transitoria si se llega a realizar una desconexión. Para realizar la desconexión del motor existen circuitos con varistores o con diodos que sirven para proteger los semiconductores.

Para lograr tensiones nulas no se realiza una desconexión, sino que se conectan dos o tres líneas de salida a la misma línea de entrada según la necesidad.

Las reglas de funcionamiento del convertidor matricial restringen la cantidad de combinaciones posibles a 27 donde seis son de fases de salida conectadas a distintas fases de entrada, 18 donde dos fases de salida están conectadas a una misma fase de entrada y tres donde las tres fases de salida están conectadas a la misma fase de entrada (Ortega, 2006, p. 20).

El convertidor matricial presenta la misma funcionalidad que un variador de frecuencia con rectificador de frente activo a pesar de tener una topología distinta. Dos grandes ventajas sobre el AFE es que ocupa un espacio mucho menor para una misma potencia nominal y que presenta una mayor eficiencia.

La principal desventaja del convertidor matricial es que solo puede generar una tensión de salida de máximo 0.86 la tensión de entrada lo que hace que no se pueda exigir la máxima potencia de los motores a menos que la tensión de alimentación del convertidor sea por lo menos un 16% superior a la tensión nominal del motor. Por lo tanto, para que pueda tener el mismo campo de acción de los demás variadores de frecuencia se podría usar con motores de 380 o 400

VAC ya que con tensiones de línea de 441 y 464 VAC respectivamente sería suficiente para alimentar estos motores a su tensión nominal.

También se podrían implementar circuitos de más de 500 VAC (si el convertidor matricial soporta estos niveles de tensión) para alimentar motores de 440 a 480 VAC con su tensión nominal.

El ser fabricado por una sola marca y ser una tecnología relativamente nueva en el mercado también puede ser una desventaja. Sin embargo, es muy probable que el convertidor matricial por sus características ocupe cada vez una parte más grande del mercado de los variadores de frecuencia inclusive en aplicaciones no regenerativas debido a su capacidad de mitigar la distorsión armónica y a su alta eficiencia.

## Apéndice P

### Niveles Máximos de Distorsión Armónica Permitidos por la Norma IEEE 519 2014

**Tabla P1**

*Límites de distorsión de tensión*

Barra de tensión V en el PCC	Armónico individual (%)	Distorsión armónica total THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1.0 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sistemas de alta tensión pueden tener por encima del 2.0% del THD donde la causa es un terminal de HVDC cuyos efectos serían atenuados en puntos de la red donde usuarios futuros tal vez se conecten.

*Fuente:* Franco Franco, J. D., & Echeverry Muñetonez, J. N. (2018). Presencia de armónicos en redes de baja tensión. p. 18. [Tesis de pregrado, Archivo PDF]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/91a22aa5-40c6-4e1a-b1cf-1bf9eb9ef7b8/content>

**Tabla P2**

*Límites de distorsión de corriente para sistemas de 120 V a 69 kV.*

Corriente máxima de distorsión armónica en porcentaje de $I_L$						
Orden de armónico individual (armónico impar) a,b						
$I_{sh}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h$	$17 \leq h$	$23 \leq h$	$35 \leq h$	TDD
$< 20^c$	4,0	$< 17$ 2,0	$< 23$ 1,5	$< 25$ 0,6	$< 50$ 0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
$> 1000$	15	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

<sup>a</sup> Incluso los armónicos se limitan a 25% del armónico impar del límite superior.

<sup>b</sup> La distorsión de corriente que resulta en un DC offset, por ejemplo, los convertidores de media onda, no está permitido.

<sup>c</sup> Todos los equipos de generación de energía se limitan a estos valores de distorsión de corriente, independientemente del actual  $I_{sh}/I_L$ .

Dónde:

$I_{sh}$  = máxima corriente de corto circuito en el punto de acople común (PCC)

$I_L$  = máxima carga de corriente demandada (componente de la frecuencia fundamental) en el punto de acople común (PCC) debajo de las condiciones de operación normal de la carga.

*Fuente:* Franco Franco, J. D., & Echeverry Muñetonez, J. N. (2018). Presencia de armónicos en redes de baja tensión. p. 19. [Tesis de pregrado, Archivo PDF]. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/91a22aa5-40c6-4e1a-b1cf-1bf9eb9ef7b8/content>

## **Apéndice Q**

### *Mitigación de Armónicos*

Para mitigar la distorsión armónica de corriente producida por los variadores de frecuencia se pueden utilizar rectificadores con baja generación de armónicos, filtros activos, filtros pasivos, reactancias de línea y reactancias de bus DC. Los rectificadores de baja generación de armónicos empleados en variadores de frecuencia pueden ser de tipo AFE o también llamados de frente activo o multipulsos.

### **Rectificador de Frente Activo**

Los rectificadores de frente activo o AFE (Active Front End) (ver Figura 7) se utilizan en aplicaciones con niveles de regeneración permanente ya que permiten un flujo de potencia bidireccional entre la red y la carga. El control del disparo de los IGBTs permite que se pueda controlar la forma de la onda de corriente lográndose así la mitigación de armónicos y el control de fase. El rectificador AFE logra generar una señal de corriente senoidal aun si la tensión de línea presenta un alto contenido armónico.

El uso de inductancias de línea es indispensable para que el rectificador de frente activo pueda funcionar correctamente ya que el almacenamiento de energía de estas, así como el almacenamiento de energía en los condensadores del circuito intermedio son los que permiten dar forma a la señal de corriente.

### **Rectificadores Multipulsos**

Los rectificadores multipulsos (ver Figura 8) son alimentados por transformadores en zigzag que brindan la cantidad de fases necesarias con sus respectivos valores de desfase. A pesar de que todos los rectificadores trifásicos son de varios pulsos, cuando se habla de

multipulsos se entiende que son rectificadores de 12 y más pulsos. El valor de pulsos siempre es múltiplo de seis y actualmente se fabrican hasta de 54 pulsos.

Los rectificadores multipulsos están compuestos por varios rectificadores de seis pulsos ya sea en serie o en paralelo. La distorsión armónica de corriente disminuye y la tensión de salida del rectificador presenta un menor rizado mientras mayor sea su número de pulsos. En un rectificador de seis pulsos el primer armónico que aparece es el quinto, en uno de 12 pulsos es el onceavo. La regla general para determinar los armónicos presentes en un rectificador multipulsos está definida en la ecuación (42).

$$N = (n \cdot k) \pm 1 \quad (42)$$

Donde N es el número del armónico presente, n es el número de pulsos del rectificador y k es un número entero. En la Tabla Q1 se observan los primeros seis armónicos presentes en un rectificador multipulsos.

*Fuente.* Autoría propia

**Figura** En la Figura Q1 se observa en amarillo la señal de corriente de la Figura 39 con los armónicos eliminados para un rectificador de 12 pulsos en azul y para un rectificador de 18 pulsos en rojo. El orden de los armónicos presentes es tan alto que su aporte a la distorsión armónica es mínimo por lo que la mitigación de la distorsión armónica de corriente es muy efectiva.

**Tabla Q1**

*Primeros seis armónicos presentes en rectificadores multipulsos*

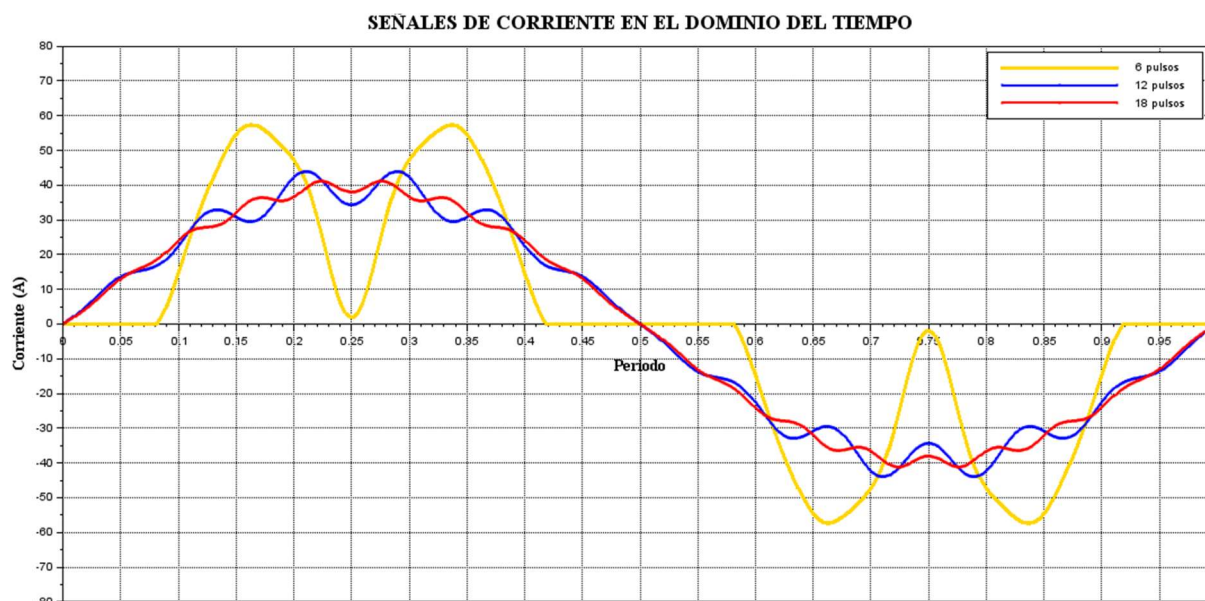
Nº pulsos	Armónicos presentes					
12	11	13	23	25	35	37
18	17	19	35	37	53	55
24	23	25	47	49	71	73

30	29	31	59	61	89	91
36	35	37	71	73	107	109

Fuente. Autoría propia

### Figura Q1

Señales de corriente con armónicos eliminados



Fuente. Autoría propia

### Filtros Activos

Los filtros activos presentan bastantes similitudes con los rectificadores AFE ya que también conmutan la red con IGBTs y pueden dar una forma y una fase deseada a la señal de corriente. En el caso de la corriente generada por los filtros activos de armónicos no se busca que sea senoidal, sino que tenga la misma forma de la señal que se produce al sumar los armónicos (sin la señal fundamental) pero con un desfase de  $180^\circ$  haciendo así que se resten y quede solo la fundamental. La realimentación de los filtros activos se realiza por medio de transformadores de corriente.

En la Figura Q2 se observa en amarillo la señal de corriente del ejemplo de la Figura 39, en azul la suma de las corrientes de componentes armónicas, en rojo la corriente que generaría

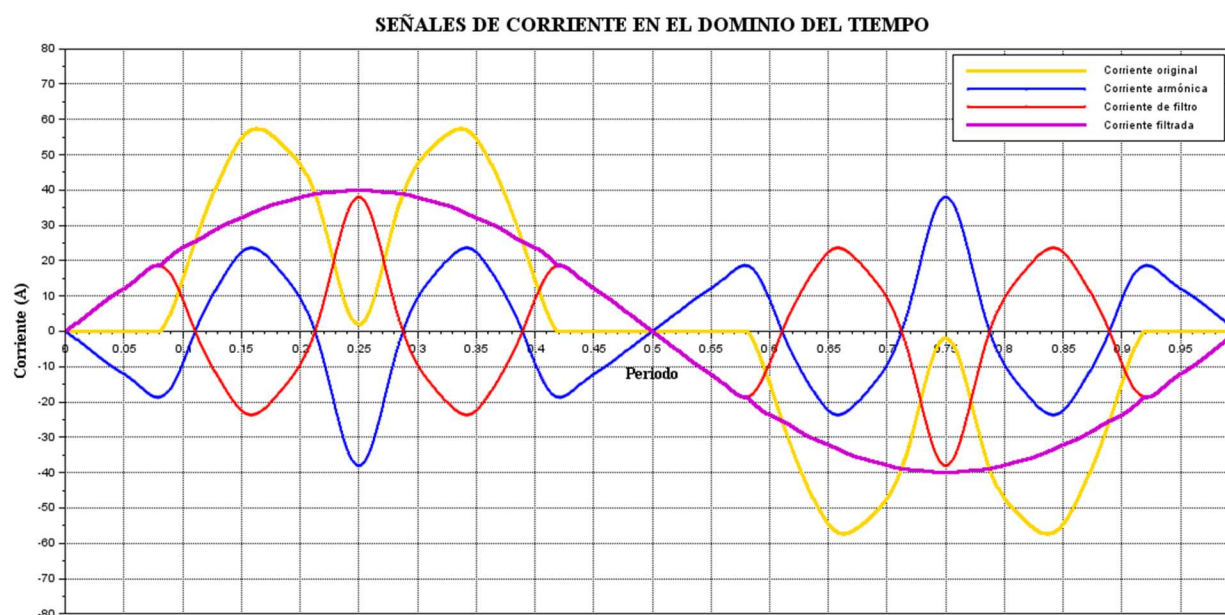


un filtro activo ideal y en violeta la señal de corriente resultante. Al sumársele la corriente del filtro a la señal sin filtrar se produce una señal senoidal.

Los filtros activos pueden utilizarse también para controlar el  $\cos(\varphi)$  aunque resultarían ser una solución demasiado costosa. Los filtros activos se pueden programar para que compensen el  $\cos(\varphi)$  o la distorsión armónica y el  $\cos(\varphi)$  al tiempo. Existen equipos muy similares a los filtros activos llamados compensadores estáticos que se utilizan para controlar el  $\cos(\varphi)$ .

### Figura Q2

*Corrientes de un sistema con filtro activo*



*Fuente. Autoría propia*

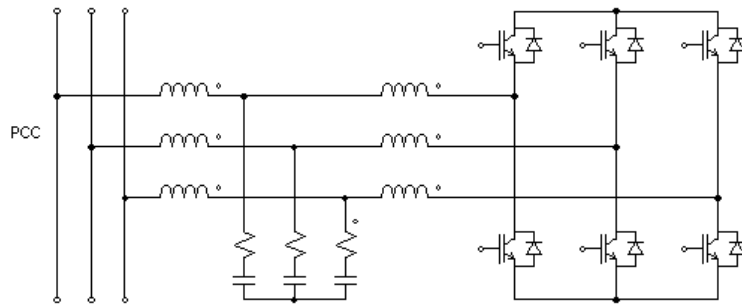
El filtro activo puede usarse para compensar la corriente de un variador de frecuencia, así como la de un circuito completo de cargas no lineales. Existen variadores de frecuencia de altas potencias que cuentan con filtro de armónicos integrado.

En la Figura Q3 se observa el esquema de un filtro activo. Los filtros activos se pueden configurar para que los sensores de corriente (CTs) de realimentación pueden instalarse tanto en el PCC como en una carga que se desee compensar. Conocer la dirección en la que están

conectados los sensores de corriente es fundamental para que el filtro activo pueda funcionar correctamente.

### Figura Q3

*Esquema de potencia de un filtro activo*

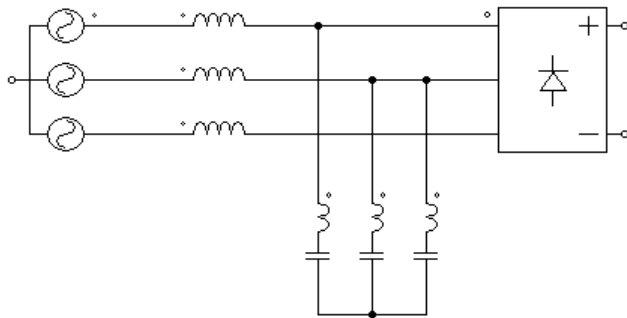


*Fuente. Autoría propia*

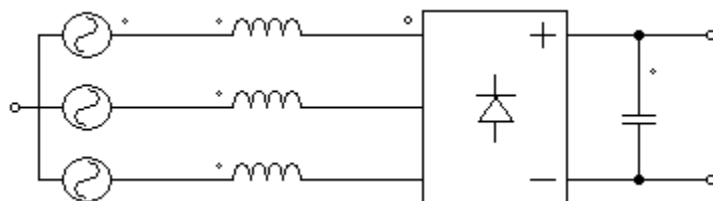
### Filtros Pasivos

Los filtros pasivos están conformados por una combinación de capacitores e inductores. Los filtros pasivos especializados para variadores de frecuencia se diseñan para eliminar armónicos a partir del quinto. Por lo tanto, Solo son compatibles con una frecuencia de alimentación. (50 o 60 Hz). A diferencia de los filtros activos los pasivos por lo general se usan para mitigar los armónicos de una sola carga, aunque es posible armar bancos de filtros pasivos y conectarlos o desconectarlos de la red según la presencia de distorsión armónica. La principal desventaja del filtro pasivo con respecto al activo es la menor eficacia en reducir armónicos con baja carga.

En la Figura Q4 se observa el esquema eléctrico de un filtro pasivo.

**Figura Q4***Esquema de filtro pasivo**Fuente. Autoría propia***Reactancias de Línea**

Las reactancias de línea se instalan en la entrada del variador y constituyen una forma económica de mitigar la distorsión armónica de corriente, aunque no tienen la misma efectividad que las soluciones antes mencionadas. También es posible usar un solo conjunto de reactancias de línea para mitigar la distorsión armónica de varias cargas. Para lograr la máxima efectividad posible se debe procurar que la corriente de componente fundamental demandada por el sistema sea lo más cercana posible a la corriente nominal de la reactancia. En la Figura Q5 se observa la conexión de una inductancia de línea.

**Figura Q5***Reactancias de línea**Fuente. Autoría propia*

Las reactancias de línea habitualmente se fabrican con impedancias de 3 y 5 % siendo las primeras las más usadas y las segundas utilizadas en casos de mayor distorsión armónica.

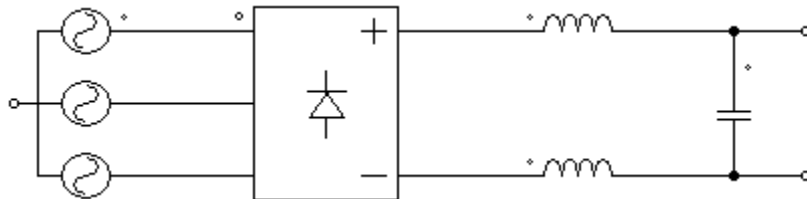
Algunos fabricantes suministran los variadores de frecuencia con las reactancias de línea incorporadas.

### Reactancias de Bus DC

Las reactancias de bus DC o circuito intermedio se encuentran entre el rectificador y los condensadores del variador de frecuencia. Por lo general vienen instaladas en variadores de gama alta, aunque existen variadores que cuentan con la posibilidad de interrumpir su circuito intermedio para instalar una reactancia en serie. Las reactancias de bus DC pueden ser una sola por lo general en el bus DC positivo o también puede usarse dos reactancias. Una en el bus DC positivo y otra en el bus DC negativo. Esta última opción es la que más usan los fabricantes en sus mejores modelos. En la Figura Q6 se observa la conexión de las inductancias del bus DC.

**Figura Q6**

*Inductancias de bus DC*



*Fuente. Autoría propia*

Las reactancias de bus DC presentan un rendimiento similar al de las reactancias de línea en cuanto a mitigación de armónicos, sin embargo, cada una presenta un nivel de mitigación distinta para cada armónico. Una ventaja que poseen las reactancias de bus DC es la de ocupar menor espacio cuando están integradas al variador de frecuencia comparando el espacio que ocupa un variador de frecuencia sin inductancias de bus DC cuando se le instalan inductancias de línea a la entrada.