

**PROTOCOLO DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES PARA LA
INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN,
CONSIDERANDO LAS CARGAS Y LOS PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD
ELECTROMAGNÉTICA.**

CARLOS FELIPE ROCHA ZULUAGA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2017

**PROTOCOLO DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES PARA LA
INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN,
CONSIDERANDO LAS CARGAS Y LOS PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD
ELECTROMAGNÉTICA.**

CARLOS FELIPE ROCHA ZULUAGA

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

Director

OSCAR ARNULFO QUIROGA QUIROGA

Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2017

Universidad Industrial de Santander (UIS)

Documento Confidencial

Ni la totalidad ni parte de este documento puede reproducirse, almacenarse o transmitirse por algún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopias, grabación magnética o electrónica o cualquier medio de almacenamiento de información y sistemas de recuperación, sin permiso escrito de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Este es un documento interno de la UIS. Al recibirlo no podrá pasarlo a persona alguna excepto las que se le indique en la lista de distribución autorizada por la UIS. Cualquier persona externa a la UIS que utilice la información en este documento asume la responsabilidad por su empleo.

© Universidad Industrial de Santander (UIS) – 2017

Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	146
1 Componentes de la instalación eléctrica de motores de inducción trifásicos.	18
1.1 Componentes principales de la instalación eléctrica de un motor.	18
1.2 Motor de inducción.	19
1.3 Controladores y circuitos de control de motores de inducción.	26
1.3.1 Magnitudes eléctricas características de los dispositivos de maniobra y protección	28
1.3.2 Elementos de maniobra	30
1.3.3 Elementos de protección.	36
2 Arranque de motores eléctricos.....	45
2.1 Arranque directo.....	46
2.2 Arranque estrella triangulo.....	51
2.3 Arranque a través de arrancador suave	54
2.3.1 Principio de funcionamiento de arrancadores suaves.	56
2.3.2 Comportamiento de las señales.	57
2.4 Arranque y operación por medio de variador de frecuencia.	61
2.4.1 Principio de funcionamiento de un variador de velocidad.....	62
2.4.2 Comportamiento de las señales.	64
3 Dimensionamiento de la instalación eléctrica para motores accionados por variadores de frecuencia.....	75
3.1 Dimensionamiento y factores de corrección de la capacidad de carga.	81

3.1.1 Criterios de dimensionamiento y factores de corrección de los motores de inducción.....	82
3.1.2 Criterios de dimensionamiento y factores de corrección de los conductores eléctricos.....	88
3.1.3 Criterios para el dimensionamiento de la protección contra sobrecarga del motor.	93
3.1.4 Criterios para el dimensionamiento de protección de circuitos ramales de motores contra cortocircuito y falla a tierra.....	95
3.2 Criterios de selección de un controlador.....	96
3.3 Puesta a tierra.....	97
4 Protocolo de dimensionamiento de los componentes para la instalación eléctrica de motores.....	100
Paso 1 : Potencia mecánica requerida por la carga.....	103
Paso 2 : Características del entorno de la instalación eléctrica.	103
Paso 3 : Características del sistema eléctrico de donde será derivada la instalación eléctrica en cuestión.....	103
Paso 4 : Corrección de potencia del motor considerando las características del entorno.....	105
Paso 5 : Tipos de carga.	105
Paso 6 : Rango de variación de velocidad.....	110
Paso 7 : Tipos de servicio.....	113
Paso 8 : Selección del tipo de control del variador de velocidad.	114
Paso 9 : Corrección de potencia considerando las señales inyectadas por el variador de frecuencia.....	115

Paso 10	: Calculo de protección contra sobrecarga.	116
Paso 11	: Dimensionamiento de cableado aguas abajo del variador.	118
Paso 12	: Calculo de corriente de cortocircuito.	119
Paso 13	: Selección del número de pulsos del variador y componentes alternativos para la instalación.	120
Paso 14	: Dimensionamiento de cableado aguas arriba del variador.	123
Paso 15	: Selección del contactor.	126
Paso 16	: Calculo de protección contra cortocircuito y falla a tierra.	127
Paso 17	: Dimensionamiento del sistema de puesta a tierra.	129
5	Conclusiones	130
6	Referencias	133
Anexo A.	Generalidades de los motores de inducción trifásicos.	138
▪	Funcionamiento del motor de inducción.	138
▪	Intensidad del motor (ABB, 2000).	140
▪	Modelo del motor de inducción.	142
▪	Pérdidas de potencia en un motor de inducción.	143
▪	Clasificación de motores de inducción.	144
▪	Tamaño de motores (Frame) (ABB, 2014).	146
▪	Tipos de servicio estandarizados (ABB, 2014).	150
Anexo B.	Códigos en Scilab	159
	Arranque directo.	159
	Arranque estrella triangulo.	163
	Arranque suave.	168

Arranque a través de variador de velocidad173

Curvas características de un relé térmico180

Lista de figuras

Figura 1. Componentes de instalaciones eléctricas de motores de inducción.	18
Figura 2. Diagrama de corte de un motor jaula de ardilla.	20
Figura 3. Placa característica utilizando la norma NEMA.	20
Figura 4. Curvas Par-Velocidad según diseño NEMA.	25
Figura 5. Categoría de motores IEC.	25
Figura 6. a) Esquema de automatismo eléctrico. b) Esquema de automatismo electrónico.	27
Figura 7. a) Pulsador. b) Seccionador portafusible. c) Contactor.	31
Figura 8. a) Relé térmico. b) Fusibles con desconexión tripolar. c) Interruptor termomagnético.	36
Figura 9. Curvas de respuestas del relé térmico para diferentes corrientes de precargas.	38
Figura 10. Curvas de disparo de interruptores termomagnéticos.	44
Figura 11. Diagrama unifilar de los tipos de arranque de motores comúnmente usados.	46
Figura 12. Circuito de potencia para el arranque directo de motores de inducción. (Símbolos de la IEC).	48
Figura 13. Curva de corriente del motor, Par motor y Par resistente versus velocidad del rotor.	49
Figura 14. Grafica de corriente en función del tiempo para un arranque directo.	50
Figura 15. Circuito de potencia para el arranque Y- Δ de motores de inducción. (Símbolos de la IEC).	52
Figura 16. Curvas Par y corriente vs velocidad para un arranque Y- Δ	54
Figura 17. Comportamiento de la corriente en función del tiempo para un arranque estrella-triángulo	54
Figura 18. Circuito de potencia para con arrancador suave. (Símbolos de la IEC).	55

Figura 19. Variantes en el circuito de potencia para arrancadores suaves.....	57
Figura 20. Corriente Vs Velocidad y Par Vs Velocidad para un arranque suave.....	57
Figura 21. Regulación de tensión monofásica con carga resistiva.	58
Figura 22. Espectro de armónico en diferentes instantes de regulación (200, 270, 330, 400 y 460 Vrms)	59
Figura 23. Corriente en función del tiempo para un arranque suave, sin tener en cuenta la distorsión armónica.....	61
Figura 24. Diagrama multifilar de la instalación eléctrica de un motor de inducción accionado con un variador de frecuencia.....	62
Figura 25. Diagrama de bloques de un variador de frecuencia.....	63
Figura 26. comportamiento de la corriente y par respecto de la velocidad, para un motor operado con un variador de velocidad	64
Figura 27. Topología de un convertidor de frecuencia de seis pulsos y salida trifásica.	65
Figura 28. Señal de corriente y espectro de armónico de un rectificador de 6 y 12 pulsos.....	67
Figura 29. Señales de voltaje y corriente inyectadas al motor modelo por un variador de frecuencia con un control six step.....	71
Figura 30. Relación del índice de modulación con el porcentaje de utilización del bus DC.	72
Figura 31. Señales de voltaje y corriente inyectadas al motor modelo por un variador de frecuencia con un control SPWM.....	73
Figura 32. Protección de un circuito por interruptor automático.	78
Figura 33. Curva de ajuste de potencia.	85
Figura 34. Factor armónico de tensión vs frecuencia de la señal portadora. Curva calculada teniendo en cuenta los valores normalizados de la Tabla 13.....	86

Figura 35. Capacidad de carga típica de un motor de inducción por jaula estándar en un accionamiento controlado por frecuencias 1) sin refrigeración independiente y 2) con refrigeración independiente.	87
Figura 36. Cableado simétrico paralelo.	89
Figura 37. Diseño de cable exclusivo para variadores de frecuencia.	90
Figura 38. a) Bandas trenzadas. b) Bandas metálicas.	98
Figura 39. Diagrama de flujo del protocolo para el dimensionamiento de componentes de una instalación eléctrica de un motor de inducción accionado con controlador electrónico.....	102
Figura 40. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par constante.	106
Figura 41. Ejemplo de cargas con par constante.....	106
Figura 42. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par lineal.	107
Figura 43. Ejemplo de cargas con par lineal.....	107
Figura 44. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par cuadrático.	108
Figura 45. Ejemplo de cargas con par cuadrático.	108
Figura 46. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par hiperbólico.	108
Figura 47. Ejemplo de maquina con par hiperbólico.....	109
Figura 48. Filtro de armónico LR	121
Figura 49. Estructura básica de filtros LCL. Recuperado de Circuitos, filtros LCL, manual de instrucciones.	122

Lista de tablas

Tabla 1. Clases de aislamiento.....	21
Tabla 2. Tipos de servicio de un motor de inducción.	22
Tabla 3. Letras código.....	23
Tabla 4. Diseño o categoría de motores de inducción jaula de ardilla.	24
Tabla 5. Valores nominales para contactores trifásicos según tamaño de norma NEMA.	33
Tabla 6. Relación entre la corriente de corte y la corriente de servicio, según la categoría de servicio.....	34
Tabla 7 Características de disparo de relés térmicos según clases.	39
Tabla 8. Porcentaje de los armónicos respecto a la tensión en diferentes instantes de regulación.	60
Tabla 9. Armónicos de corriente en diferentes instantes de regulación de tensión.	60
Tabla 10. Porcentaje típico de armónicos de corriente inyectados a la red por un rectificador de seis pulsos más inductancia en CA.....	66
Tabla 11. Porcentaje típico de armónicos de corriente inyectados a la red por un rectificador de doce pulsos.....	66
Tabla 12. Porcentaje de armónicos de tensión y corriente respecto a los valores fundamentales.	70
Tabla 13. Armónicos normalizados para la tensión de salida de un variador de frecuencia con control SPWM con un índice de modulación de frecuencia mayor que diez.	73
Tabla 14. Límite de distorsión de voltaje.....	76
Tabla 15. Límite de distorsión de corriente (120 a 69 kV).....	77
Tabla 16. Factor de corrección para considerar la reactancia de los cables.	80

Tabla 17. Corrientes a plena carga de motores trifásicos de inducción.....	81
Tabla 18. Temperaturas ambientes que compensan el aumento de temperatura por altitud	83
Tabla 19. Factor de de-rateo por altitud y temperatura ambiente	83
Tabla 20. Factores de corrección por temperatura.....	91
Tabla 21. Factores de corrección por agrupamiento de conductores en cables o canalizaciones.	91
Tabla 22. Factor de efecto piel para cualquier tipo de conductor	92
Tabla 23. Criterios para selección o ajuste de valores de corriente permisible por el dispositivo de protección contra sobrecarga	93
Tabla 24 Criterios para selección o ajuste de valores máximos de corriente permisible por el dispositivo de protección contra sobrecarga si los valores de la Tabla 23 son inadecuados para el arranque u operación de la máquina.	94
Tabla 25. Criterios para selección o ajuste de valores máximos de corriente permisible por el dispositivo de protección integrado al motor contra sobrecarga por fallas en el arranque...94	
Tabla 26. Capacidad máxima o ajuste de disparo de los dispositivos de protección para circuitos ramales de motores contra cortocircuito y falla a tierra.....	95
Tabla 27. Calibre mínimo de los conductores de puesta a tierra.	99
Tabla 28. Valores de tensión para sistemas trifásicos de baja tensión.....	104
Tabla 29. Categoría o tipo de diseño del motor según tipo de carga.	109
Tabla 30. Potencia permitida en porcentaje de la potencia nominal para servicio de corta duración y servicios intermitente.	114

RESUMEN

TITULO: PROTOCOLO DE DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES PARA LA INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN, CONSIDERANDO LAS CARGAS Y LOS PROBLEMAS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA. *

AUTOR: CARLOS FELIPE ROCHA ZULUAGA **

PALABRAS CLAVE: INSTALACIÓN, DIMENSIONAMIENTO, COMPONENTES.

DESCRIPCIÓN:

La inclusión de sistemas electrónicos en instalaciones de uso final reduce la eficiencia de los elementos que la conforman, por tal motivo, se deben ajustar los valores nominales de cada componente considerando las perturbaciones electromagnéticas generadas por los elementos electrónicos.

En este documento se muestra una descripción de cada uno de los componentes que conforman la instalación eléctrica para el accionamiento de motores de inducción, las características de arranques convencionales y arranques a través de controladores electrónicos (arrancador suave y variador de velocidad), se demuestra por que el variador de frecuencia es considerado el elemento perturbador, se determinan los criterios que se deben considerar para el dimensionamiento de cada uno de los componentes de la instalación teniendo en cuenta los armónicos generados por el elemento perturbador y por último se realiza una descripción del protocolo para el dimensionamiento de los componentes que conforman la instalación eléctrica de motores de inducción operados por medio de un variador de frecuencia. Además de los criterios comúnmente usados para el dimensionamiento de los componentes, se observa el ajuste de los parámetros nominales del motor producto de la inyección de señales de tensión distorsionada y el ajuste de la resistencia y capacidad de conducción del cableado por efecto piel, asimismo se seleccionan los dispositivos de protección considerando la cargabilidad de los componentes una vez se ajustan sus valores nominales. Para el desarrollo del presente protocolo se consideraron criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica

ABSTRACT

TITLE: PROTOCOL OF DIMENSIONING OF THE COMPONENTS FOR THE ELECTRICAL INSTALLATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS, CONSIDERING THE CHARGES AND THE PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. *

AUTHOR: CARLOS FELIPE ROCHA ZULUAGA **

KEYWORDS: INSTALLATION, DIMENSIONING, COMPONENTS.

DESCRIPTION:

The inclusion of electronic systems in end-use facilities reduces the efficiency of the elements that make it up, for this reason, the nominal values of each component must be adjusted considering the electromagnetic disturbances generated by the electronic elements.

This document shows a description of each of the components that make up the electrical installation for the drive of induction motors, the characteristics of conventional starts and starts through electronic controllers (soft starter and variable speed drive), is demonstrated because the frequency inverter is considered the disturbing element, the criteria that must be considered for the dimensioning of each of the components of the installation are determined taking into account the harmonics generated by the disturbing element and finally a description of the protocol is made for the sizing of the components that make up the electrical installation of induction motors operated by means of a frequency inverter. In addition to the commonly used criteria for dimensioning the components, it is possible to observe the adjustment of the nominal parameters of the motor produced by the injection of distorted voltage signals and the adjustment of the resistance and capacity of the wiring through the skin effect. they select the protection devices considering the chargeability of the components once their nominal values are adjusted. For the development of this protocol, legal, regulatory, regulatory and technical criteria were considered.

* Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga, Doctor en Ciencias con Énfasis en Ingeniería Eléctrica

INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos de inducción, son usados en diversas aplicaciones, desde el hogar hasta la industria, y la instalación eléctrica para su correcto funcionamiento se vuelve más compleja a medida que aumenta la potencia del motor. Con el desarrollo de los dispositivos electrónicos de potencia y la aparición de nuevas aplicaciones para los motores, comienzan a aparecer otros problemas relacionados principalmente con la no linealidad de las cargas que dificultan el correcto dimensionamiento de la instalación eléctrica.

Un sistema de accionamiento de potencia (*Power Drive system, PDS*) está constituido por el motor, el dispositivo de control y otros elementos tal como dispositivos de protección y cableado. Su diseño se ejecuta partiendo del requerimiento de la carga y seleccionando los dispositivos estandarizados cuyas capacidades nominales cumplan los requerimientos para la correcta alimentación o funcionamiento de la carga. La inclusión de dispositivos no lineales en estos sistemas genera un reto extra a la hora de dimensionar y seleccionar los componentes que hacen parte de la instalación eléctrica. Esto se debe a la necesidad de derratear los elementos del PDS que operaran bajo la influencia de señales distorsionadas. Dicha distorsión genera pérdidas adicionales en los elementos de la instalación, causando una disminución de la eficiencia del sistema (Domingo, 2015).

Aunque no se tiene un estándar para el cálculo de la eficiencia de los componentes eléctricos bajo condiciones de no linealidad, se ha desarrollado varios métodos para estimar las pérdidas adicionales en un componente debido la presencia de señales distorsionadas (Grajales, Ramírez, & Cadavid, 2004), y otros trabajos, consideran parámetros de compatibilidad electromagnética para el dimensionamiento de instalaciones de uso final (Malagon, 2014). Los métodos expuestos,

permiten principalmente la formulación de los factores de corrección por presencia de perturbaciones electromagnéticas, los cuales se deben adicionar al dimensionamiento convencional.

El presente trabajo de grado se desarrolla con el objetivo de plantear un referente para el dimensionamiento de los elementos que conforman instalaciones eléctricas para motores de inducción accionados por medio de arrancadores electrónicos, por ser este el sistema de arranque más utilizado en la actualidad.

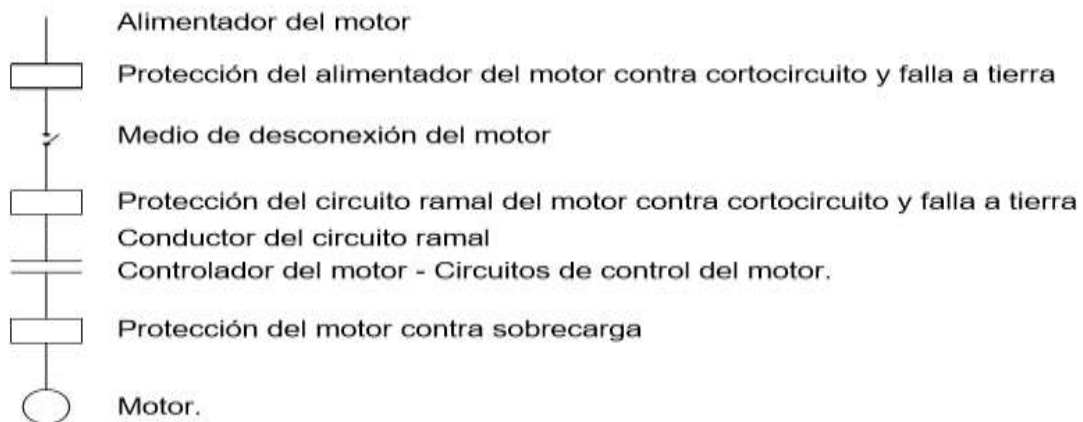
El documento se divide en cuatro secciones: En la sección uno se muestra un enfoque detallado de cada uno de los componentes de la instalación eléctrica de motores de inducción, donde se realiza una descripción de los parámetros de diseño desde diferentes perspectivas y se definen criterios de selección para cada dispositivo. En la sección dos, se analiza por medio de simulaciones el arranque de un motor utilizando las técnicas de arranque directo, arranque estrella triángulo, arranque suave y arranque a través de un variador de frecuencia, en donde se obtienen las características par-velocidad, corriente-velocidad, corriente en función del tiempo, el espectro de armónico de los sistemas de arranques electrónicos y las formas de ondas de las señales de entrada y salida del respectivo controlador. En la sección tres, se presenta en detalle los criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos para el dimensionamiento y selección de los elementos de la instalación. En la sección cuatro se desarrolla el protocolo para el dimensionamiento de los componentes de la instalación, basado en los parámetros descritos en la sección uno, los resultados obtenidos en la sección dos, los criterios determinados en la sección tres y los activos concernientes al tema.

1 Componentes de la instalación eléctrica de motores de inducción trifásicos.

En este capítulo se muestra una descripción general de cómo está compuesta la instalación eléctrica para motores de inducción. Se dan definiciones detalladas de los motores asíncronos trifásicos, así como de los demás elementos que forman parte fundamental de la instalación, tal como el sistema de control, los dispositivos de protección, el sistema de puesta a tierra, los conductores y otros que se definen según las aplicaciones del motor.

1.1 Componentes principales de la instalación eléctrica de un motor.

Los componentes de la instalación eléctrica para los motores según la norma técnica colombiana



(NTC 2050) se describen en la Figura 1.

Figura 1. Componentes de instalaciones eléctricas de motores de inducción. Adaptado de ICONTEC, Código eléctrico colombiano (NTC 2050), Bogotá, D.C; 1998

- Alimentador del motor: Todos los conductores del circuito entre el equipo de acometida, la fuente de un sistema derivado independiente u otra fuente de suministro de energía eléctrica y el dispositivo de protección contra sobrecorriente del circuito ramal final.
- Protección del alimentador del motor contra cortocircuito y falla a tierra: Sistema de protección del circuito alimentador contra sobrecorrientes.
- Medio de desconexión del motor: Dispositivo capaz de desconectar al motor y al controlador del alimentador.
- Protección del circuito ramal contra cortocircuito y falla a tierra: Sistema de protección del circuito ramal contra sobrecorrientes.
- Circuito ramal: conductores entre el dispositivo final de protección contra sobrecorriente y la salida.
- Controlador del motor: Dispositivo o conjunto de dispositivos encargados de ejecutar el control para el arranque u operación del motor.
- Protección del motor contra sobrecarga: Sistema de protección contra sobrecarga del motor.
- Motor: Dispositivo capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica.

1.2 Motor de inducción.

Funciona normalmente con una velocidad constante, que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje. Debido a su gran simplicidad, robustez y bajo costo, es el motor más utilizado de todos, adecuado para casi todos los tipos de máquinas accionadas encontradas en la práctica. En el anexo A se describe el funcionamiento, el modelo y las pérdidas de potencia de dicho motor.



Figura 2. Diagrama de corte de un motor jaula de ardilla. Recuperado de Chapman, S. J. Máquinas eléctricas. Quinta edición, Mc Graw Hill; 2016

1.2.1.1 Datos de placa de un motor de inducción.

Las diferencias que existen entre los datos de placa de un motor a otro dependen de la norma usada, las más comunes son la IEC y la NEMA. En la Figura 3 se observa un ejemplo de placa característica según las normas mencionadas.

NEMA Premium [®] SIEMENS		UL [®] US CE
NEMA PREMIUM [®] EFFICIENCY		CONNECTION
TYPE: SD100	DUTY: CONT. 3 PH	① ② ③
HP: 200	CLASS INSULT: F S.F.: 1.15	LINE
KW: 149.2	S.F. AMPS: 238.0	
FRAME: 449 TS TEFC	AMB. TEMP: 40 °C	
VOLTS: 460	TEMP. RISE: CLASS B	
AMPS: 207.0	NEMA DESIGN: A	
R. P. M: 3575 Hz: 60	kVA CODE: G	3003614364-11
NEMA NOM EFF: 95.4 %	PART No.: 1LE23214PA403AK3-Z	
SH. END BRG: 80BC03JP3	SERIAL No.:	
OPP. END BRG: 80BC03JP3	LR 39020	
VFD COMPATIBLE AT 1.0 S.F.	MADE IN MEXICO BY SIEMENS GDL	
20-1 V.T. 4-1 C.T.		

Figura 3. Placa característica utilizando la norma NEMA. Recuperado de industria.siemens.com.mx & ecatalog.weg.net.

Los datos que debe contener la placa característica de un motor de inducción son los siguientes (Ventura, 2008):

Número de serie (SER NO): Es el número de identificación de cada motor, dado por el fabricante. **Tipo (TYPE):** Combinación de letras, números o ambas designados por el fabricante para identificar el tipo de carcasa.

Número del modelo (MODEL): Datos adicionales de identificación por parte del fabricante.

Potencia (HP-W): La potencia nominal (en HP o en kW) que desarrolla un motor en su eje cuando se aplica el voltaje y la frecuencia nominal a los terminales del motor, con un SF de 1

Armazón (FRAME): Es un código alfanumérico que indica las dimensiones de la carcasa/bastidor y del montaje del motor. Dicho código esta estandarizado según las normas internacionales. En anexo A se amplía esta definición.

Factor de servicio (SF): El Factor de Servicio se expresa como un multiplicador el cual se aplica a la potencia de placa del motor, para indicar la carga que puede llevar en condiciones nominales de servicio (NEMA MG1, 2016). El factor de servicio define una capacidad de sobrecarga continua.

Amperaje (A): Indica la intensidad de corriente que demanda el motor cuando se conecta a tensión y frecuencia nominal, cuando funciona a plena carga.

Voltaje (V): Valor de la tensión de diseño del motor.

Clase de aislamiento (INSUL): Es la especificación de aislamiento térmico. Define la máxima temperatura que soporta el motor continuamente sin que se afecte su vida útil. El estándar NEMA GM1 define cuatro clases de aislamientos para generadores y motores es decir las clases A, B, F y H establecidas en conformidad con la IEEE std 1. En la Tabla 1 se muestran en resumen las clases de aislamiento y las temperaturas de diseño.

Tabla 1.
Clases de aislamiento.

Clase	Prot.	T° Amb [°C]	ΔT° [°C]	Tol [°C]	T° total [°C]	Clase	Prot.	T° Amb [°C]	ΔT° [°C]	Tol [°C]	T° total [°C]
A	Abierto	40	50	15	105	F	Abierto	40	90	25	155
	Cerrado	40	55	10	105		Cerrado	40	95	20	155
B	Abierto	40	70	20	130	H	Abierto	40	110	30	180
	Cerrado	40	75	15	130		Cerrado	40	115	25	180

Nota 1. Clase = Clase de aislamiento; Prot = Protección; T° Amb = Temperatura ambiente; ΔT° = Incremento de temperatura; Tol = Tolerancia a puntos calientes; T° total = Temperatura total.

Nota 2. Adaptado de "Motor and Generator (NEMA MG1)". National Electrical Manufacturers Association, 2016.

Velocidad (RPM): Es la velocidad de rotación del eje del motor cuando se entrega la potencia nominal a la maquina impulsada, con el voltaje y la frecuencia nominal aplicada a los terminales del motor (Velocidad nominal).

Frecuencia (HERTZ): Es la frecuencia eléctrica del sistema de suministro para la cual está diseñado el motor. Posiblemente este también funcione a otras frecuencias, pero se modificarían los parámetros de operación normal.

Servicio (DUTY): El estándar NEMA define dos tipos de servicio, continuo e intermitente. Si es continuo significa que el motor puede operar las 24 horas del día durante todo el año, si es intermitente se indicara el periodo de trabajo, lo cual indica que el motor puede operar a plena carga durante ese tiempo y luego parar hasta alcanzar la temperatura ambiente. En otras palabras, los motores de funcionamiento intermitente no alcanzan el equilibrio de temperatura.

La IEC utiliza ocho designaciones de ciclo de trabajo para describir las condiciones de funcionamiento del motor eléctrico las cuales se muestran en Tabla 2.

Tabla 2.
Tipos de servicio de un motor de inducción.

S1	Continuo	S6	Continuo con carga intermitente
S2	Corta duración	S7	Continuo con frenado eléctrico
S3	Intermitente	S8	Continuo con cambios de carga y velocidad
S4	Intermitente con arranque	S9	Variaciones no periódicas de carga y velocidad
S5	Intermitente con arranque y frenado eléctrico	S10	Cargas y velocidades constantes diferenciadas

Nota: Adaptado de IEC 60034-12, 2016.

En el anexo A se describe cada uno de estos tipos de servicio.

Temperatura ambiente (°C): Es la temperatura ambiente máxima a la cual el motor puede desarrollar su potencia nominal sin peligro. Si la temperatura máxima es superada hay que reducir la potencia entregada para evitar daños al sistema de aislamiento.

Número de fases (PHASE): Número de fase para el cual está diseñado el motor.

Letra código (CODE): Código usado para evaluar la corriente de arranque. La norma IEC no presenta este código, pero muestra la relación entre la corriente nominal y la corriente de arranque.

La norma NEMA ha establecido la letra de código para los motores tipo jaula de ardilla, la cual representa las condiciones de partida en kVA por cada hp, cuando el motor parte a plena tensión y de donde se puede obtener la corriente de arranque.

Tabla 3.
Letras código

Letra código	kVA/kW	kVA/HP
A	0 -4,21	0-3,14
B	4,22-4,75	3,15-3,54
C	4,76-5,35	3,55-3,99
D	5,36-6,02	4,0-4,49
E	6,03-6,69	4,5-4,99
F	6,70-7,49	5,0-5,59
G	7,50-8,43	5,6-6,29
H	8,44-9,50	6,3-7,09
I	9,51-10,71	7,1-7,99
K	10,72-12,05	8,0-8,99
L	12,06-13,39	9,0-9,99
M	13,40-15,00	10,0-11,19
N	15,01-16,74	11,2-12,49
P	16,75-18,75	12,5-13,99
R	18,76-21,43	14,0-15,99
S	21,44-24,16	16,0-17,99
T	24,17-26,80	18,0-19,99
U	26,81-30,01	20,0-22,39
V	30,02 y más	22,4 y más

Nota: Adaptado de ICONTEC, Código eléctrico colombiano (NTC 2050), Bogotá, D.C; 1998

Para obtener la corriente de arranque se debe aplicar la siguiente fórmula.

$$I_{arr} = \frac{\text{Razón de LC}}{\sqrt{3} * V_{nominal}} P_{sal} * 1000 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

I_{arr} - Es la corriente de arranque.

Razón de LC - Es la relación kVA/kW o kVA/HP correspondiente a la letra código.

$V_{nominal}$ - Es la tensión nominal del motor.

P_{sal} - Es la potencia mecánica que entrega el motor.

Por otro lado, la IEC muestra la relación entre la corriente nominal y la corriente de arranque.

Diseño o categoría (DISING o CAT): Los motores eléctricos se clasifican según su curva Par (Torque) - Velocidad, que relaciona su capacidad de producir torque en el eje, con la velocidad. La Categoría y Diseño establecen los valores mínimos normalizados, de acuerdo con las características del par y corriente, con relación a la velocidad desde el arranque, para los motores trifásicos de inducción con rotor de jaula de ardilla. Para identificar dicha característica se graba la letra de diseño del motor según el estándar NEMA GM1 o la categoría según el estándar IEC 60034-12. En la Tabla 4 se realiza una descripción de los tipos de diseño de acuerdo con las normas mencionadas.

Tabla 4.
Diseño o categoría de motores de inducción jaula de ardilla.

DISING (NEMA)	CAT (IEC)	Descripción
A	--	Corriente de arranque relativamente elevada y par de arranque normal.
B	N	Corriente de arranque y par de arranque normal.
C	H	Corriente de arranque normal pero par de arranque superior al diseño B o categoría N
D	D	Diseño con el mayor par de arranque.

En la Figura 4 se presenta las curvas características de los motores de inducción según clasificación NEMA.

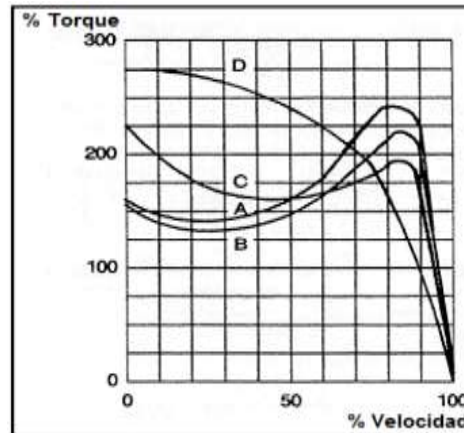


Figura 4. Curvas Par-Velocidad según diseño NEMA. Recuperado de Motortico. Diseño y categoría en motores eléctricos; febrero 2004. Obtenido de www.motortico.com

Las curvas par-velocidad de las diferentes categorías pueden ser vistas en la Figura 5.

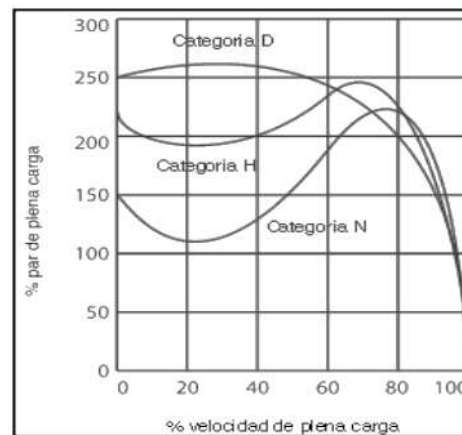


Figura 5. Categoría de motores IEC. Recuperado de Motortico. Diseño y categoría en motores eléctricos; febrero 2004. Obtenido de www.motortico.com

Las equivalencias entre normas son las siguientes:

Diseño B = Categoría N

Diseño C = Categoría H

Diseño D = Categoría D

El comportamiento par-velocidad de los motores de inducción de rotor devanado es similar a los motores de diseño D o categoría D.

Rodamientos (SE BEARING y EO BEARNING): Se refiere al tipo de rodamiento usado en el motor se designan con un código alfanumérico de acuerdo con las normas Antifricción Bearing Manufacturers Association (AFBMA).

Eficiencia (EFF): Es la razón de la potencia de salida útil y la potencia de entrada expresada en porcentaje.

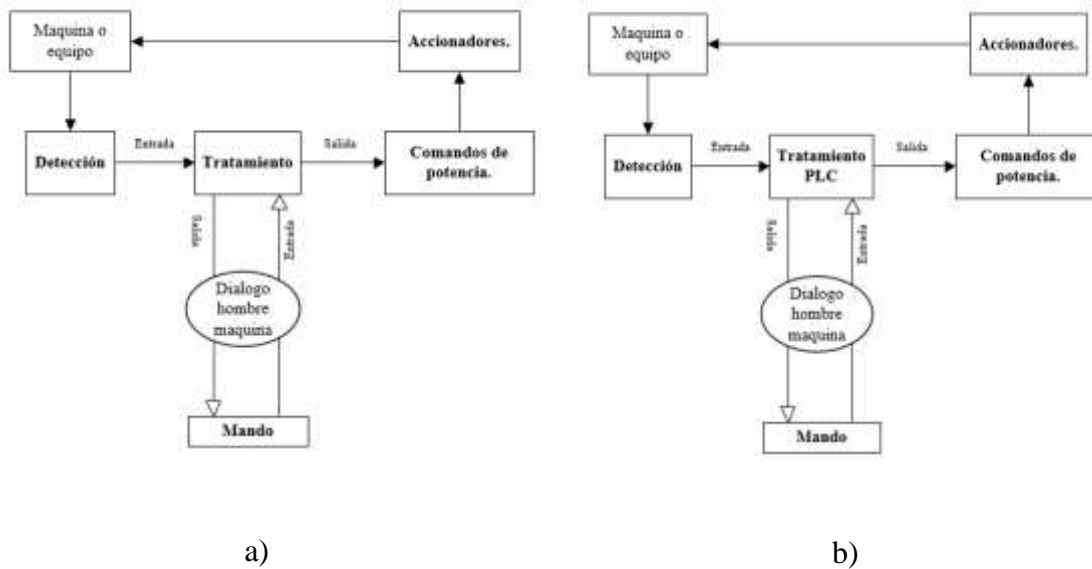
Factor de potencia (PF o $\cos\Phi$): Es la razón entre la potencia activa medida en kilowatts que demanda el motor y la potencia aparente medida en kilo-voltamperios que demanda el motor.

1.3 Controladores y circuitos de control de motores de inducción.

Cuando se habla de controladores y circuito de control se hace referencia al sistema que controlara los parámetros eléctricos como la tensión, corriente y frecuencia, pero que a la vez modifica parámetros mecánicos como par, potencia y velocidad.

Uno de los parámetros que normalmente se desea controlar es la corriente de arranque de un motor de inducción debido a su elevada demanda durante el proceso de partida, sin embargo, realizar un control directo de la intensidad de corriente es muy difícil, por ello se realiza el control de la tensión y/o frecuencia eléctrica obteniendo a través de esto los cambios requeridos en los niveles de corriente. Para lograr tal objetivo se debe recurrir a automatismos eléctricos (técnicas de lógica cableada) o automatismos electrónicos (técnicas de lógica programable) los cuales dependen de la diversidad de sus componentes (Flower, 1990).

La diferencia entre los automatismos mencionados se encuentra en la etapa de tratamiento, la cual define el tipo de técnica de control usada, en la Figura 6 se observa un esquema general de las dos técnicas de control mencionadas.



Deteccion → Interruptores de posición, termostatos, presostatos, detectores, etc.

Comandos de potencia → Preaccionadores, contactores principales, variadores de velocidad, arrancadores suaves, relés térmicos, etc.

Mando → Pulsadores, selectores, manipuladores, pilotos.

Accionadores → Motores.

Tratamiento → Contactos auxiliares, relés, temporizadores, bloques de memoria.

Tratamiento PLC → Controlador lógico programable.

Figura 6. a) Esquema de automatismo eléctrico. b) Esquema de automatismo electrónico.

Estos automatismos se pueden resumir en tres bloques, bloque operativo, bloque de dialogo hombre máquina y bloque de comando y automatización.

Bloque operativo: Está compuesto por la maquina en sí y los accionadores. Se entiende por accionador a aquel elemento de una maquina encargado de suministrar energía mecánica para su funcionamiento (Sánchez, 2008). Existen varios tipos de accionadores clasificados según el tipo de energía que transforman tal como:

- Eléctricos
- Hidráulicos
- Neumáticos
- Térmicos

Sin embargo, enfocaremos nuestro estudio solo a un accionador en especial, el motor eléctrico de inducción descrito con anterioridad.

Bloque dialogo hombre maquina: En este bloque de automatismo el operario vigila y aporta sus propios datos a los ya adquiridos.

Bloque de comando y automatización: Compuesto por la adquisición, tratamiento de datos y comandos de potencia.

Los elementos que comúnmente hacen parte de esta etapa son:

- Dispositivos de maniobras: Los cuales interrumpen el paso de corriente desde la red a una carga. Estos dispositivos pueden ser manuales, automáticos y la combinación de ambos además pueden tener poder de corte o carecer de esto.
- Dispositivos de protección: Son aquellos dispositivos destinados a proteger todo o parte del circuito, separándolo de la línea de alimentación cuando se presentan irregularidades en su funcionamiento, particularmente por sobrecarga y cortocircuito.

En la etapa de tratamiento, se pueden usar los dispositivos de maniobra si el control se ejecuta a través de la lógica cableada, si se utiliza la lógica programable se remplazarán todos estos dispositivos por un PLC.

1.3.1 Magnitudes eléctricas características de los dispositivos de maniobra y protección

Los dispositivos de maniobra y protección se caracterizan por parámetros comunes de operación y diseño algunos de estos parámetros son los siguientes:

Tensión nominal o tensión de empleo (U_e): Es el valor de tensión eficaz (V_{rms}) en el cual los dispositivos trabajan en óptimas condiciones.

Tensión asignada de aislamiento (U_i): Es la máxima tensión que es capaz de soportar el dispositivo sin presentar daños en el aislamiento.

Tensión nominal de impulso (U_{imp}): Valor de cresta de una tensión de choque, de forma y polaridad prescritas, que debe poder soportar el material sin que se produzca una descarga eléctrica, en unas condiciones de ensayo específicas, y que sirve como referencia para los valores de las distancias de aislamiento. La tensión asignada de resistencia a los choques de un material debe ser igual o superior a los valores fijados para las sobretensiones transitorias que aparecen en el circuito donde está colocado dicho material.

Corriente térmica (I_{th}): Es el valor de corriente (valor eficaz en CA o valor en régimen permanente en CC) que el dispositivo puede conducir en un régimen de 8 horas, sin que la elevación de temperatura de sus diferentes partes exceda límites especificados.

Corriente térmica convencional en envolvente (I_{the}): La corriente térmica convencional en envolvente de un material es el valor de la corriente, fijado por el fabricante, que debe utilizarse en los ensayos de recalentamiento del material cuando éste va montado en una envolvente específico. Dichos ensayos son obligatorios si el material se describe como material en envolvente en los catálogos del fabricante y se destina normalmente a ser utilizado con una o varias envolventes de tipo y tamaño específicos. El valor de la corriente térmica convencional en

envolvente debe ser al menos igual al valor máximo de la corriente asignada de empleo del material en envolvente, en servicio de 8 horas.

Corriente ininterrumpida nominal (I_n): Es el valor de corriente, definido por el fabricante, que el interruptor puede conducir en régimen ininterrumpido. En el caso de los interruptores regulables, corresponde a la máxima corriente de regulación posible.

Una vez definidos estos parámetros se describirán los elementos de maniobrar y protección además de los arrancadores normalmente usados para el control y operación de motores de inducción, indicando las características eléctricas propias de cada dispositivo y los criterios de selección.

1.3.2 Elementos de maniobra

Los elementos de maniobra son dispositivos que nos permiten cerrar o abrir un circuito cuando se requiere. En la Figura 7 se muestran algunos elementos de maniobra comúnmente usados.



Categoría de empleo de los contactores: Las categorías de empleo normalizadas fijan los valores de corriente que el contactor debe establecer o cortar y estas dependen de la naturaleza del receptor controlado y de las condiciones en que se realicen los cierres y las aperturas.

A continuación, se definen las categorías de empleo de contactores eléctricos según la norma IEC 60947-1 para corriente alterna.

AC-1: Se aplica a todos los aparatos de uso de corriente alterna (receptores), cuyo factor de potencia es al menos igual a 0,95 ($\text{Cos}(\phi) \geq 0,95$). Ejemplos de utilización: calefacción, distribución.

AC-2: Esta categoría rige el arranque, el frenado a contracorriente y la marcha “a sacudidas” de los motores de anillos.

- En el cierre, el contactor establece la corriente de arranque, aproximadamente 2,5 veces la corriente nominal del motor.
- En la apertura, deberá cortar la corriente de arranque, con una tensión igual a la tensión de la red.

AC-3: Se aplica a los motores de jaula en los que el corte se realiza con el motor lanzado.

- En el cierre, el contactor establece la corriente de arranque, que es de 5 a 7 veces la corriente nominal del motor.
- En la apertura, el contactor corta la corriente nominal absorbida por el motor; en ese momento, la tensión en las bornas de sus polos se acercará al 20% de la tensión de la red. El corte resulta sencillo.

Ejemplos de utilización: todos los motores de jaula habituales: ascensores, escaleras mecánicas, cintas transportadoras, elevadores de cangilones, compresores, bombas, trituradoras, climatizadores, etc.

AC-4: Esta categoría se aplica a las aplicaciones con frenado a contracorriente y marcha “a sacudidas” con motores de jaula o de anillos. El contactor se cierra bajo un pico de corriente que puede alcanzar de 5 a 7 veces la corriente nominal del motor. Al abrirse, corta esta misma corriente bajo una tensión tan elevada que la velocidad del motor se debilita. Esta tensión puede llegar a ser igual que la tensión de la red. El corte resulta brusco. Ejemplos de utilización: máquinas de impresión, máquinas de trefilar, elevadores, equipos de la industria metalúrgica.

Tamaño de los contactores: El tamaño de un contactor depende de la intensidad de corriente que es capaz de establecer, soportar e interrumpir, así como del número de contactos del cual dispone y de la tensión máxima de trabajo que puede soportar, la cual suele ser de 660 V para los contactores de normal uso en la industria.

La NEMA y la IEC definen cada uno un código para caracterizar el tamaño de los conductores, en la Tabla 5. se realiza un comparativo de esta norma para contactores usados para el accionamiento de motores de inducción.

Tabla 5.
Tamaño de contactores.

Tamaño NEMA	Corriente nominal (Max. 600V)	Potencia máxima en HP		IEC (En AC-3)
		220 V	440 V	
00	9	1,5	2	A9
0	18	3	5	A18
1	27	7,5	10	A26-A30
2	45	15	25	A40-A50
3	90	30	50	A95
4	135	50	100	A145

5	270	100	200	A300
6	540	200	400	AF580
7	810	300	600	AF750
8	1215	450	900	AF1350

Nota 1: Adaptado de ABB, *Catalogo- tablas y formulas prácticas.*

Nota 2: Los tamaños equivalentes en la norma IEC representan otros valores de corriente nominal normalizados, por ejemplo, A300 presenta una corriente nominal de 300 A.

Elegir un contactor para una aplicación específica significa determinar la corriente que los contactos principales deben establecer y cortar, en unas condiciones de utilización definidas por la aplicación y el ambiente, sin que se presenten calentamientos ni desgaste excesivo de los contactos.

Criterios para la selección de un contactor:

- Uno de los factores primordiales en el momento de definir el tipo de contactor es la característica eléctrica de la fuente de alimentación, la cual define el tipo de corriente, tensión de alimentación y frecuencia eléctrica (fuente AC).
- El siguiente paso es conocer la corriente de servicio (I_e = corriente de empleo) que consume el receptor.
- A partir del tipo de receptor se debe obtener la categoría de servicio.
- Con la categoría de servicio se obtiene la corriente de corte (I_c) aplicando el factor I_c/I_e mostrado en la Tabla 6.
- Una vez conocemos la corriente de corte definimos el tamaño del contactor.
- Además de los parámetros mencionados se debe conocer las condiciones del entorno con el objeto de definir el índice de protección IP.

Tabla 6.

Relación entre la corriente de corte y la corriente de servicio, según la categoría de servicio.

Categoría	I_c/I_e	FP
AC-1	1	0,95
AC-2	2,5	0,65
AC-3	1	0,35
AC-4	6	0,35

Nota 1: Adaptado de Flower Leiva, *Instalaciones eléctricas*. Tomo III, Alfaomega.

Para trabajos silenciosos o con frecuencias de maniobras muy altas es recomendable el uso de contactores estáticos o de estado sólido.

Parámetros de un contactor:

Tal como lo indica el estándar IEC 60947-1 los parámetros que definen un contactor son los siguientes.

Tensión nominal, tensión asignada de aislamiento, tensión nominal al impulso, corriente térmica y los siguientes:

- **Corriente asignada de empleo (I_e):** Es la corriente nominal máxima del receptor que el contactor puede establecer, soportar e interrumpir en unas condiciones de utilización definidas, sin recalentamiento excesivo ni desgaste exagerado de los contactos (máxima intensidad aconsejable para que conmute).
- **Corriente de llamada:** Corriente que circula por la bobina de un contactor, la cual produce el campo magnético inicial capaz de vencer el par ejercido por los muelles o resortes que mantienen separados los contactos.
- **Corriente de mantenimiento:** Corriente capaz de mantener un campo magnético adecuado para que los contactos permanezcan unidos, esta corriente es aproximadamente 10 veces menor que la corriente de llamada.
- **Poder asignado de cierre (conexión) I_{ci} (I_c):** Intensidad en el momento de la conexión del contactor.
- **Poder asignado de corte (desconexión) I_{co} (I_d):** Intensidad en el momento de la desconexión del contactor.

- **Durabilidad mecánica:** Número de ciclos de maniobras en vacío que puede ejecutar un contactor sin afectar la integridad del dispositivo.
- **Durabilidad eléctrica:** Número de ciclos de maniobras en carga que es capaz de efectuar el contactor sin reparaciones ni cambios de piezas, en las condiciones de servicio indicadas en la correspondiente norma.

1.3.3 Elementos de protección.

Para efecto de este documento se hará una descripción de los dispositivos comúnmente usados para la protección de motores eléctricos de inducción. En la Figura 8 se muestran algunos de estos dispositivos.

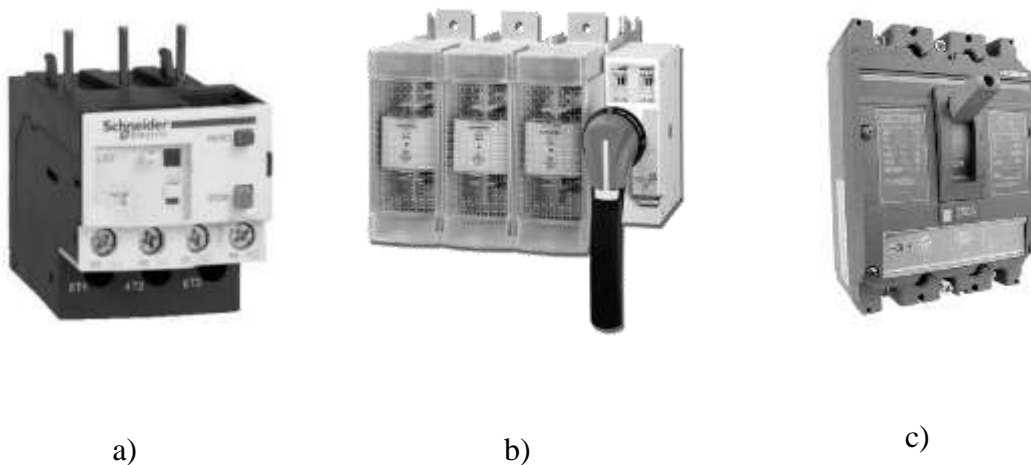


Figura 8. a) Relé térmico. b) Fusibles con desconexión tripolar. c) Interruptor termomagnético. Recuperado de es.slideshare.net

1.3.3.1 Relé térmico

Estos relés cumplen con la función de protección térmica del motor contra sobrecargas y van asociados a un contactor que es el que realiza la apertura del circuito de potencia. Puesto que protegen solamente contra sobrecargas, los relés térmicos deben complementarse con una protección contra cortocircuitos.

El principio de funcionamiento se basa en la deformación de láminas construidas con dos metales de diferentes coeficientes de dilatación soldados entre sí, la deformación de las láminas es el resultado del flujo de corriente desde la red al motor a través de una resistencia arrollada al bimetálico.

Los bimetálicos iniciarán su deformación cuando las corrientes sobrepasen los valores nominales para lo cual fue diseñada la resistencia; este deslizamiento provocará la conmutación de los contactos auxiliares.

Los motores eléctricos deben ser protegidos en base a sus constantes de tiempo, vigilando las temperaturas alcanzadas en comparación con la máxima admisible como función de la duración de la sobrecarga. La temperatura es obtenida de forma indirecta, a través de la medición de la corriente.

Suponiendo que el proceso térmico que tiene lugar en un motor de inducción sometido a un régimen de sobrecarga es un proceso adiabático, es decir que todo el calor desarrollado contribuye a la elevación de temperatura de los arrollamientos, se llega a que el tiempo de sobrecarga admisible del motor está dado por:

$$t_a = \tau_m \frac{A - I_{pc}^2}{I^2 - I_{pc}^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: t_a es el tiempo admisible, τ_m la constante de tiempo térmica de la máquina, I la corriente de sobrecarga en pu, I_{pc} la intensidad de precarga en pu y A un coeficiente mayor que 1, usualmente 1.3.

En la Figura 9 se muestra gráficamente la Ecuación 2 para diferentes intensidades de precarga y una constante de tiempo térmica de 30 minutos, donde se observa entonces que el tiempo de sobrecarga admisible está relacionado con la condición de precarga del motor, por lo que el relé térmico deberá ser sensible al estado de precarga. Es por esto por lo que la mayoría de los relés térmicos dan sus curvas para distintos estados de precarga.

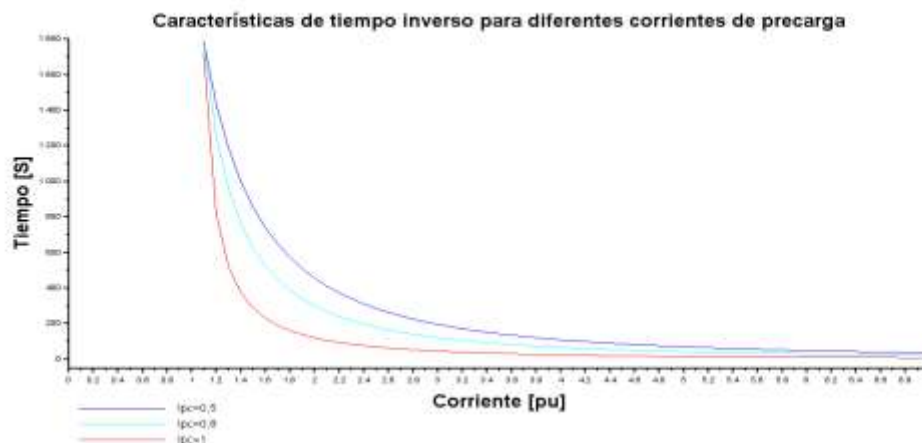


Figura 9. Curvas de respuestas del relé térmico para diferentes corrientes de precargas.

La IEC 60947-4 define tres tipos de disparos para relés de protección térmica indicando tiempos de no apertura y de apertura, clasificados en las siguientes clases.

- Relés de clase 10: válidos para todas las aplicaciones de corrientes con una duración de arranque inferior a 10 segundos o menos al 600% de su corriente nominal
- Relés de clase 20: admiten arranques de hasta 20 segundos de duración o menos al 600% de su corriente nominal.
- Relés de clase 30: para arranques con un máximo de 30 segundos de duración o menos al 600% de su corriente nominal.

Criterios para la selección de un relé térmico: Para la elección de este mecanismo se debe tener en cuenta el tiempo máximo de la sobreintensidad no admisible, y asegurar que la intensidad del receptor esté comprendida dentro del margen de regulación de la intensidad del relé.

Una vez instalado el dispositivo se debe ajustar la intensidad de regulación de disparo a los valores de corriente nominal del motor.

En la Tabla 7 se muestran las características de los relés térmicos según la clase de disparo.

Tabla 7
Características de disparo de relés térmicos según clases.

Clase	$I_r=1,05I_n$	$I_r=1,2I_n$	$I_r=1,5I_n$	$I_r=7,2I_n$
10A	>2h	<2h	<2min	2s<ta<10s
10	>2h	<2h	<4min	2s<ta<10s
20	>2h	<2h	<8min	2s<ta<20s
30	>2h	<2h	<12min	2s<ta<30s

Nota 1: I_r : intensidad de regulación de disparo térmico; I_n : corriente de empleo; ta: tiempo admisible.

Los datos representan las características de disparo de un relé térmico partiendo del estado frío.

Nota 2: Recuperado de IEC 60947-4-1 Aparata de baja tensión. Parte 4-1: Contactores y arrancadores de motor. Contactores y arrancadores electromecánicos; 2009

Parámetros de un relé térmico: Además de las características eléctricas mencionadas en sección 1.3.1 se deben considerar:

- **Intensidad de regulación de disparo térmico (I_r):** Es la mínima corriente admisible por el relé térmico para que se ejecute el disparo, la cual se debe ajustar a la corriente nominal del motor.

1.3.3.2 *Guardamotor magnético*

Son dispositivos de protección contra cortocircuito, de corte tripolar. Los guarda-motores magnéticos cumplen la función de protección contra cortocircuitos, cumpliendo adicionalmente la función de seccionamiento.

Los requisitos para que cumplan con la función de protección contra cortocircuito son básicamente una pronta detección de la corriente de defecto y una rápida apertura de los contactos. Esto conduce a que los guarda-motores magnéticos sean aparatos limitadores. Normalmente se ubica el umbral de disparo entre 10 y 14 veces la corriente nominal.

Parámetros de los guarda-motores magnéticos: Además de las características eléctricas mencionadas en sección 1.3.1 se deben considerar:

- **Intensidad de regulación de disparo magnético:** Es la mínima corriente admisible para el disparo magnético, esta corriente puede ser ajustable o fija, depende de las características del guarda-motor magnético.
- **Capacidad de interrupción de cortocircuito último (Icu):** Representa el máximo valor de corriente de cortocircuito de interrupción, a la tensión nominal y en las condiciones de ensayo especificadas. Esta corriente debe ser mayor que la corriente de cortocircuito trifásica de la red.
- **Capacidad de interrupción de cortocircuito en servicio (Ics):** Es el valor de corriente de cortocircuito de interrupción sin comprometer la continuidad del servicio, a la tensión nominal y en las condiciones de ensayo especificadas. Se expresa como un porcentaje de Icu, generalmente 25, 50 o 100 %

1.3.3.3 Fusibles

El fusible es dispositivo utilizado para proteger dispositivos eléctricos. Este dispositivo permite el paso de la corriente mientras ésta no supere un valor establecido. Está compuesto por un filamento o lámina metálica capaz de fundirse a una determinada temperatura producto del efecto joule, aislando de esta manera el circuito de corrientes no admisibles.

La norma IEC 60269-1 creó un código para distinguir a los fusibles formado por solamente dos letras, siendo minúscula la primera y mayúscula la restante.

Primera letra define el régimen operativo del fusible, ya sea sobrecarga, cortocircuito o ambos.

g: Indica que el fusible interrumpe toda clase de corrientes (sobrecargas y cortocircuitos).

a: Indica que el fusible es capaz de interrumpir solo corrientes de cortocircuitos.

La segunda letra define la categoría de utilización del fusible, o el equipo a proteger.

G: Indica que el fusible protege líneas y aparatos en general.

L: Indica que el fusible protege líneas y aparatos en general.

M: Indica que el fusible protege Motores.

Tr: Indica que protege Transformadores.

C: Indica que protege a condensadores y circuitos capacitivos.

R: Protege semiconductores de potencia, rectificadores y circuitos electrónicos.

B: Indica que es aplicable en la minería.

Ejemplo:

gM: Fusible con capacidad para interrumpir todas las corrientes para uso en motores.

aM: Protegen contra altas sobre intensidades hasta su poder de corte nominal, y deben asociarse a dispositivos de protección térmica contra pequeñas sobre intensidades. Para uso en motores. **Parámetros de los fusibles:** Las características eléctricas de los fusibles son:

- **Corriente nominal**
- **Capacidad de ruptura [Irup]:** Es la máxima corriente a tensión nominal que el fusible es capaz de interrumpir sin que en él se presenten daños físicos.
- **Tipo de corriente:** AC o DC.
- **Frecuencia:** Frecuencia eléctrica si es AC.
- **Clases de fusión en los fusibles:** El tipo de fusión es otra característica importante que considerar en la elección de un fusible y dependerá de los tipos de cargas conectadas al circuito que se desea proteger
- y los parámetros descritos en la sección 1.3.1

1.3.3.4 *Protección termomagnética*

Estos interruptores se encuentran equipados con dos dispositivos de protección conectados en serie, y que reaccionan gracias a dos efectos que produce la corriente eléctrica cuando circula por un conductor: Temperatura y Campos Magnéticos. Por ello, estos dispositivos están equipados con un disparador térmico que actúa durante la aparición de sobrecorrientes bajas (sobrecarga) y de un disparador magnético para las sobrecorrientes elevadas (cortocircuitos). De aquí, proviene el nombre de "interruptor termomagnético".

Para que un interruptor termomagnético cumpla eficazmente su propósito de proteger el cableado de sobrecargar y cortocircuitos directos debe respetarse el tipo de curva y la corriente de cortocircuito máxima que soporta. Además de cumplir con las normativas de cada país, deben cumplir con dos puntos principales:

- La curva de disparo de acuerdo con el tipo de corriente de trabajo.
- La capacidad de ruptura de cortocircuito, mayor o igual a la corriente de trabajo. Se clasifican con tres letras:

Curva B: Protección de generadores, de personas y grades longitudes de cables.

Sobrecarga: Termino estándar.

Cortocircuito: Umbrales magnéticos fijados por curvas B (Im entre 3 y 5 In o 3,2 y 4,8 In según dispositivos y la IEC 60947-2 respectivamente).

Curva C: Protección de cables alimentando receptores clásicos.

Sobrecarga: térmico estándar.

Cortocircuito: umbrales magnéticos fijados por curva C (Im entre 5 y 10 In o 7 y 10 según dispositivos y la IEC 60947-2 respectivamente).

Curva D: Protección de cables alimentando receptores con fuertes puntas de arranque.

Sobrecarga: térmico estándar.

Cortocircuito: umbrales magnéticos fijados por curva D (Im entre 10 y 14 In según IEC 60947

En la Figura 10 se muestran las curvas de disparo termomagnéticos donde se observa:

1. Límites de disparo térmico en frío.
2. Límites de disparo electromagnético.

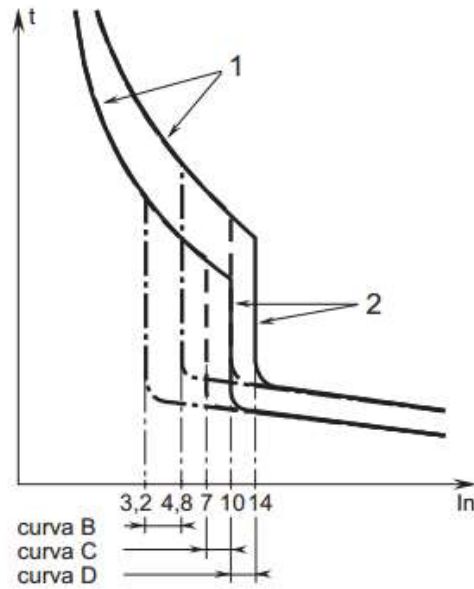


Figura 10. Curvas de disparo de interruptores termomagnéticos. recuperado de www.Schneider-electric.es

Los parámetros eléctricos de este tipo de interruptores están conformados por los parámetros descritos para el relé térmico y el guarda-motor magnético.

2 Arranque de motores eléctricos.

La combinación de los dispositivos de maniobras, los elementos de protección, el sistema de puesta a tierra, el cableado y otros elementos como son los arrancadores electrónicos conforman el sistema de arranque de los motores de inducción según las necesidades, tal como se mencionó en el inicio de la sección 1.3. Uno de los parámetros que comúnmente se desea controlar, es la corriente de arranque para los motores de inducción, dicho control se ejecuta indirectamente a través del control de la tensión y/o frecuencia, para lo cual se han desarrollado una diversidad de técnicas que contribuyen a este fin.

El uso de sistemas de control electrónicos para motores trifásicos de inducción tales como variadores de velocidad y arrancadores suaves, trae consigo un reto mayor a la hora de dimensionar los componentes de la instalación eléctrica. Se debe considerar los límites operacionales y la susceptibilidad de los componentes de la instalación ante la presencia de señales de tensión y corriente distorsionadas, producto de la inclusión de dispositivos electrónicos en la instalación. Si el sistema es dimensionado sin tener en cuenta este tipo de consideraciones probablemente se incurrirá en un subdimensionamiento, de dichos componentes, incluyendo al motor de inducción, el cual presenta una reducción de la eficiencia en presencia de armónicos (Sánchez M. , 2009). En el diagrama unifilar de la Figura 11 se describe las cuatro técnicas de mayor uso para el arranque y operación de motores de inducción, las cuales se describen en las siguientes secciones.

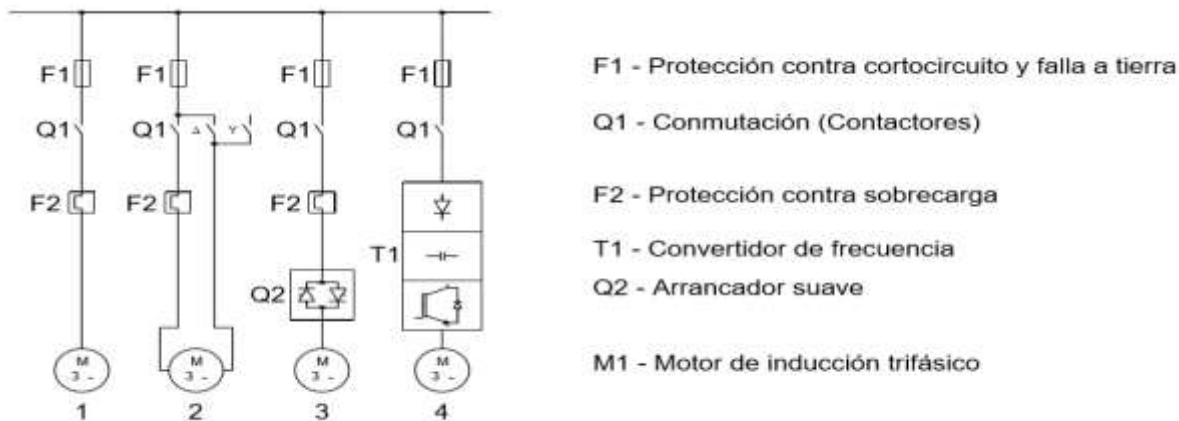


Figura 11. Diagrama unifilar de los tipos de arranque de motores comúnmente usados.

- (1) Arranque directo.
- (2) Arranque estrella – triángulo.
- (3) Arranque suave.
- (4) Arranque y operación a través de convertidor de frecuencia.

2.1 Arranque directo

A pesar de que en este tipo de arranque de motores de inducción no existe control alguno de los parámetros mencionados, se cita con el objeto de tener un punto de partida para las tres técnicas restantes teniendo en cuenta que esta es la manera más simple de arrancar un motor, lo cual consiste en conectar directamente el motor a la red. Este tipo de arranque demanda una corriente transitoria elevada y desarrolla un máximo par mecánico de arranque que acelera la carga mecánica acoplada al eje del motor a plena velocidad en el tiempo más corto posible. Las ventajas que tiene este tipo de arranque son:

- Sencillez del equipo

- Elevado par de arranque
- Arranque rápido
- Bajo costo

El arranque a través de la línea o tensión plena puede ser utilizado donde esta corriente elevada transitoria (corriente de arranque) y el par de arranque no sean objetables. Por lo tanto, el uso de este tipo de arranque se limita a aplicaciones donde:

- La potencia del motor es débil con respecto a la red.
- La máquina accionada no requiere de un aumento progresivo de velocidad o dispone de elementos mecánicos que impiden el arranque brusco.

Por lo general, el arranque directo sobre la línea se puede efectuar hasta 50 HP en 220 Volts y hasta 100 HP en 440 Volts. Arriba de estos límites habrá que utilizar algún sistema de arranque a tensión reducida o velocidad variable (Ventura, 2008). Todos los sistemas de arranque de motores eléctricos están compuestos por dos circuitos, el circuito de potencia y el circuito de control.

Las posibles asociaciones de los elementos de protección y maniobras para el arranque directo de los motores trifásicos de inducción son las siguientes.

- Seccionador – fusible – contactor – relé térmico – motor eléctrico.
- Guarda-motor magnético – contactor – relé térmico – motor eléctrico.
- Interruptor termomagnético – contactor – motor eléctrico.
- Interruptor termomagnético – contactor – interruptor térmico – motor eléctrico.

En la Figura 12 se detalla el diagrama multifilar, del circuito de potencia para el arranque directo de motores trifásicos de inducción, utilizando la última asociación de componentes descrita y la simbología de la norma IEC.

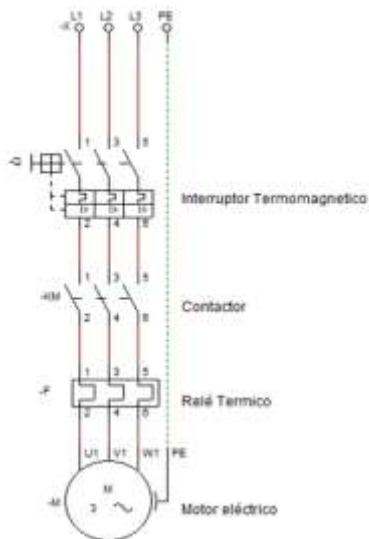


Figura 12. Circuito de potencia para el arranque directo de motores de inducción. (Símbolos de la IEC).

Para caracterizar el comportamiento de los motores de inducción se utiliza los parámetros y el modelo del circuito típico de un motor de inducción con las siguientes características. 460 V, 60 Hz, 25HP cuatro polos, conectado en Y y con las siguientes impedancias por fase:

$$R1=0,641 \Omega; X1=1,106 \Omega$$

$$R2=0,332 \Omega; X2=0,464 \Omega$$

$$XM=26,3 \Omega$$

En la Figura 13 se observa el comportamiento de la corriente y el par referente a la velocidad.

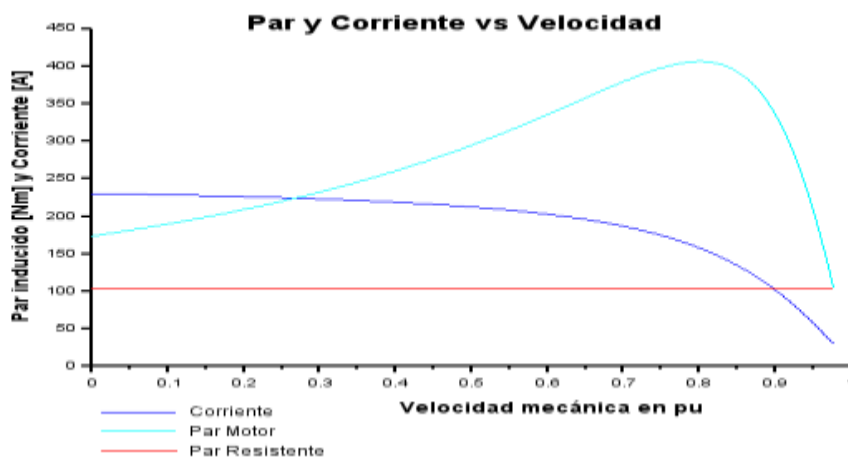


Figura 13. Curva de corriente del motor, Par motor y Par resistente versus velocidad del rotor.

Este comportamiento es válido para el arranque directo y sin ningún tipo de perturbaciones.

De estas curvas se puede observar que:

- La corriente de arranque (229 A) es aproximadamente ocho veces la corriente de trabajo (29,3 A).
- El par de arranque del motor es un poco mayor que el par a plena carga o par resistente, de modo que el motor arrancara portando cualquier carga que pueda alimentar a potencia plena.
- Existe un par máximo (405 Nm) el cual es llamado par de desviación, equivalente a cuatro veces el par nominal de plena carga del motor (103 Nm).

Las curvas descritas para el motor se pueden dividir en tres regiones:

La primera es la región de bajo deslizamiento ($S \approx 0$; $n \approx 1$), Un aumento de la carga en esta región produce un incremento en el deslizamiento y la corriente de forma aproximadamente lineal, en esta región la frecuencia del rotor es pequeña respecto a la frecuencia de red, por lo

tanto, la reactancia del rotor es despreciable por lo que el factor de potencia del rotor es aproximadamente la unidad.

La segunda región se conoce como región de deslizamiento moderado, en esta región la frecuencia del rotor es mayor que en la primera región y la reactancia del motor tiene un valor en magnitud aproximadamente igual a la resistencia del rotor, además la corriente ya no se incrementa tan rápidamente como antes y el factor de potencia del rotor comienza a disminuir. En esta región se presenta el par máximo del motor.

La tercera región se conoce como región de alto deslizamiento, en esta región el par inducido disminuye ante un incremento de la carga puesto que el aumento de la corriente del motor no se percibe debido a la disminución del factor de potencia del motor.

Con el objeto de graficar la corriente en función del tiempo se asume un momento de inercia propio del motor de $0.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ (Dato extraído de catálogo de motores de ABB con características similares). En la siguiente figura se puede ver el comportamiento de la corriente donde se observa un tiempo de arranque aproximadamente igual a 0.3s , además de la corriente transitoria del arranque y la corriente en estado estable.

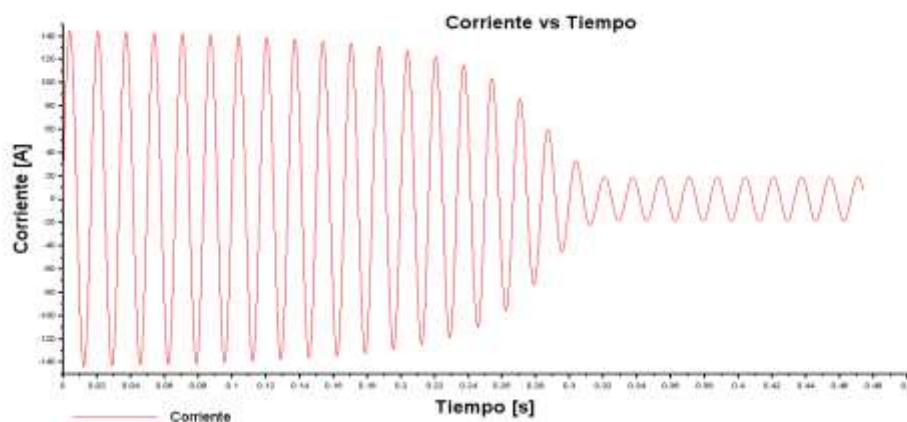


Figura 14. Grafica de corriente en función del tiempo para un arranque directo.

2.2 Arranque estrella triangulo

Este tipo de arranque solo es posible en motores que tengan las dos extremidades de cada devanado del estator en la placa de bornas. El acoplamiento en triangulo debe corresponder con la tensión de empleo del motor.

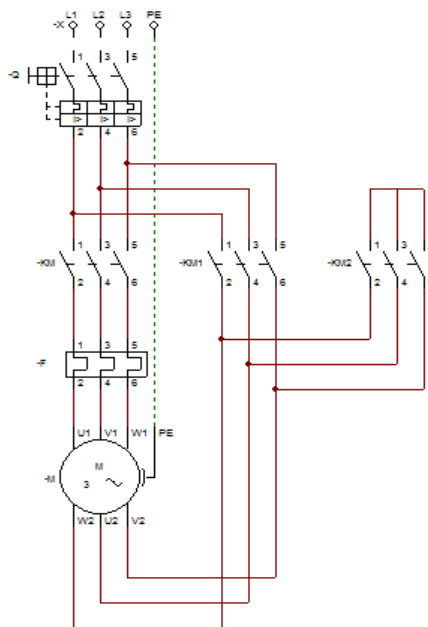
El principio de este tipo de arranque consiste en iniciar el motor con el bobinado conectado en estrella con un a tensión de línea igual a la nominal lo que representa para luego pasar la conexión de los devanados a triangulo, esta maniobra permite iniciar el motor con una corriente reducida, respecto a la corriente de un arranque directo. La cual tendrá un valor de:

$$I_{ydev} = I_{yL} = \frac{V_{\phi}}{Z_{Dev}} = \frac{V_l}{\sqrt{3} * Z_{Dev}}$$

$$I_{\Delta dev} = \frac{V_l}{Z_{Dev}}$$

$$I_y = \frac{I_{\Delta dev}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{\Delta L}}{\sqrt{3} * \sqrt{3}} = \frac{I_{\Delta L}}{3} \quad \text{Ecuación 3}$$

La corriente de arranque en estrella es un tercio de la corriente de arranque en delta. El



esquema multifilar de esta técnica se presenta en la Figura 15.

Figura 15. Circuito de potencia para el arranque Y-Δ de motores de inducción. (Símbolos de la IEC).

Las curvas que caracterizan el comportamiento par-velocidad y corriente-velocidad de un motor de inducción iniciado con la técnica estrella triángulo presentan dos fases, una de arranque en estrella y la segunda es la transición y operación en delta.

Normalmente la velocidad del motor se estabiliza cuando se equilibran el par del motor y el par resistente, regularmente entre el 75 y 85% de la velocidad nominal. En ese momento, los devanados se acoplan en triángulo y el motor rinde según sus características. Mediante un temporizador se controla el tiempo de transición del acoplamiento en estrella al acoplamiento en triángulo.

La corriente que recorre los devanados se interrumpe con la apertura del contactor de estrella y se restablece con el cierre del contactor de triángulo. En paso al acoplamiento en triángulo va acompañado de una punta de corriente transitoria, tan breve como importante, debida a la fuerza contra electromotriz del motor.

El arranque estrella-triángulo es apropiado para las máquinas cuyo par resistente es débil o que arrancan en vacío.

Dependiendo del régimen transitorio en el momento del acoplamiento en triángulo, puede ser necesario utilizar una variante que limite los fenómenos transitorios cuando se supera cierta potencia:

En la Figura 16 se muestra el comportamiento característico del par y la corriente citando el motor de los ejemplos anteriores y asumiendo que se puede ejecutar una conexión en triángulo, (asunción que no es posible en una situación real), para esto se asume una tensión de línea de 265V. La transición se ejecuta a una velocidad de 90% de la velocidad síncrona.

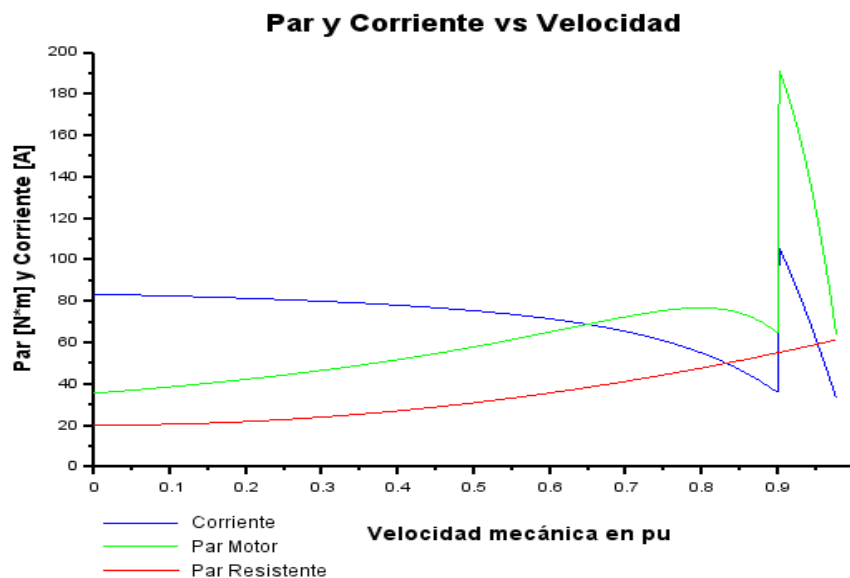


Figura 16. Curvas Par y corriente vs velocidad para un arranque Y-Δ.

Se percibe un pico de corriente en el momento de la transición de estrella a triángulo el cual depende del instante en que se ejecute el cambio.

La relación entre la corriente de arranque y la corriente nominal es de alrededor de 2,5 mientras que la relación entre la corriente pico y la corriente nominal es de 3, sin embargo, esta perturbación presenta un tiempo corto de duración comparado con el tiempo de arranque y es dependiente del instante en que se ejecute la transición. En la Figura 17 se muestra el comportamiento de la corriente respecto del tiempo para un momento de inercia igual a $0,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

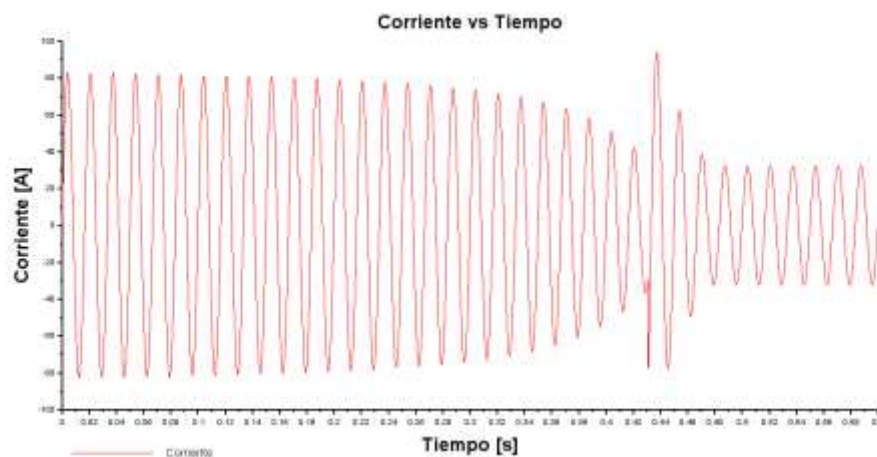


Figura 17. Comportamiento de la corriente en función del tiempo para un arranque estrella-triángulo

2.3 Arranque a través de arrancador suave

Tal como se observó en las curvas características del arranque directo y estrella triángulo, se producen picos de intensidad y momentos que pueden causar influjos negativos al sistema o al motor mismo.

Lo ideal en el momento del arranque es un aumento del par sin choque y un nivel de intensidad apropiado, lo cual se puede conseguir con un arrancador suave electrónico. Este regula la tensión de alimentación continuamente hasta alcanzar el periodo estacionario. De este modo el motor trifásico se ajusta al comportamiento de carga de la máquina acelerándose cuidadosamente. Además, suprime los choques mecánicos y las puntas de intensidad.

Para lograr el control de la tensión inyectada al motor se utilizan interruptores de estado sólido conectados en antiparalelo, normalmente tiristores controlados a través de los ajustes de ángulos de disparo, lo cual hace posible arrancar y parar un motor eléctrico de manera suave y controlada. Es necesario contar con un sistema de protección contra sobrecarga y cortocircuito los cuales pueden venir integrados con el arrancador suave tal como se muestra en el diagrama de la Figura 18.

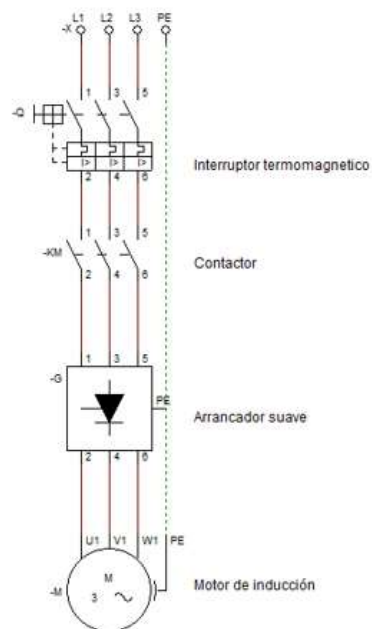
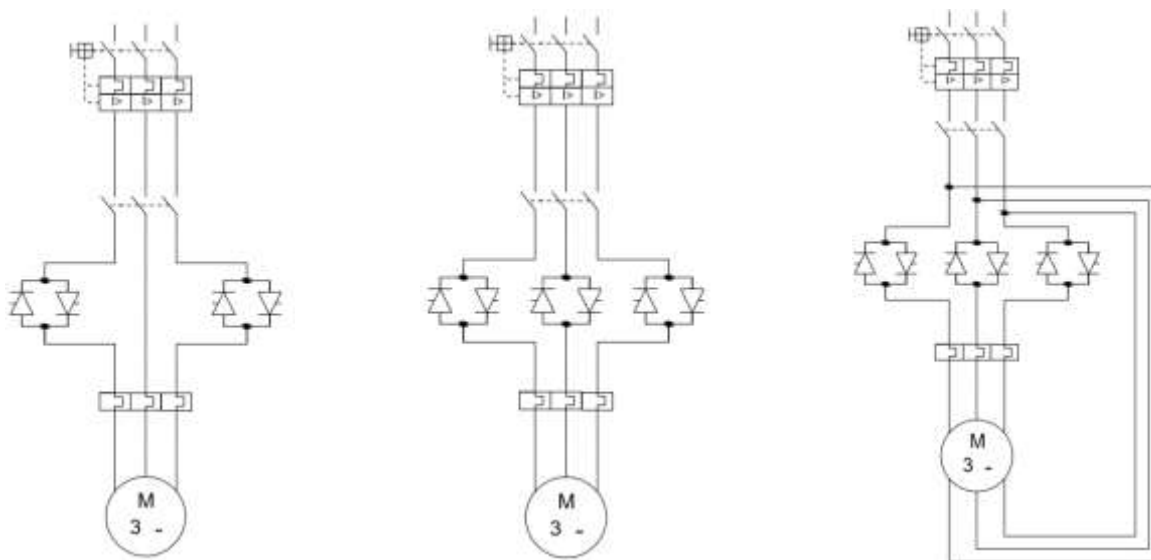


Figura 18. Circuito de potencia para con arrancador suave. (Símbolos de la IEC).

2.3.1 Principio de funcionamiento de arrancadores suaves.

La tensión del motor en un arrancador se modifica por el control del ángulo de cada fase en media onda sinusoidal. Con este fin, dos tiristores en cada una de las fases están conectados en antiparalelo, uno de ellos para la media onda positiva y el otro para la media onda negativa. Cuando la rampa de aceleración (tiempo de arranque) ha finalizado los tiristores están completamente controlados por lo tanto pueden ser bypassados a través de unos contactos de bypass durante la operación continua.

El tiempo de aceleración de una unidad con un arrancador suave es el resultado de la configuración de la tensión de arranque y el tiempo de rampa (tiempo de arranque) para el aumento lineal hasta la tensión completa de red. La tensión inicial determina el par de arranque del motor. En la práctica, el par de arranque necesario y el tiempo de rampa se configuran de acuerdo con los requisitos del arranque. Hoy en día, en arrancadores suaves, podemos hacer una diferenciación entre tres variantes en la configuración de potencia tal como lo muestra la topología de la Figura 19.



- Dos fases controladas
- Tres fases controladas
- Tres fases controladas
- Conexión en línea.
- Conexión en línea.
- Conexión en delta

Figura 19. Variantes en el circuito de potencia para arrancadores suaves.

El comportamiento de la corriente y el par de un motor de inducción depende en gran medida de la rampa programada. Para observar dicho comportamiento se simula el arranque del motor usado como ejemplo, con una tensión de arranque de 200 V la cual se incrementa de forma lineal hasta alcanzar los 460 V de tensión nominal. En la Figura 20 se observa el comportamiento de la corriente y el par respecto de la velocidad para el arranque suave.



Figura 20. Corriente Vs Velocidad y Par Vs Velocidad para un arranque suave

2.3.2 Comportamiento de las señales.

Cuando nos referimos a una variación de la tensión a través del control de la fase de disparo nos imaginamos una variación tal como se muestra en la Figura 21, pero la realidad es otra, cuando la carga es inductiva como es el caso de los motores eléctricos los tiristores no se apagan

directamente cuando la fuente de tensión se invierte debido a que en la carga inductiva la corriente no puede ser disipada instantáneamente por lo tanto transcurre un tiempo hasta que la corriente se hace cero.

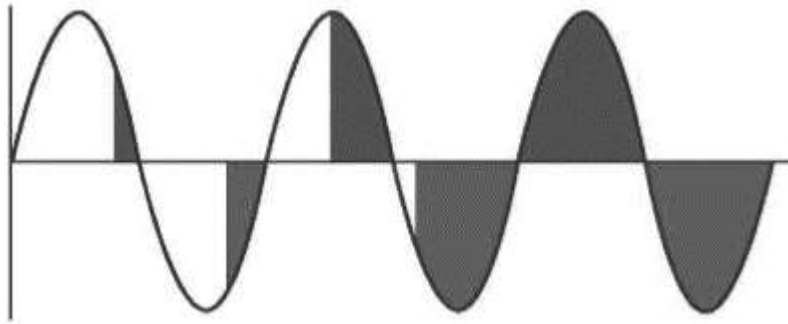


Figura 21. Regulación de tensión monofásica con carga resistiva.

Existen tres regiones de disparos para para los tiristores que conforman el arrancador suave con tres fases controladas, teniendo en cuenta que los disparos se ejecutan de forma simétrica para cada tiristor, se define solo un semiciclo para clasificar dichas regiones.

Región 1: Ángulo menor a 60° , en esta región la tensión es igual a la tensión de la fuente.

Región 2: Ángulo entre 90° y 120° , en esta región dos conductores de diferentes fases conducen simultáneamente o existen periodos en los que ninguno conduce.

Región 3: Ángulo de disparo mayor a 120° , si el ángulo de disparo es mayor a 120° entonces solo un conductor conducirá y la tensión en el lado de la carga será cero.

Los arrancadores suaves generan distorsión armónica en un grado realmente poco significativo cuando los motores quedan funcionando a tensión nominal, bien sea a través de bypass o a través de sí mismos. Sin embargo, algunos equipos modernos tienen la opción de ahorro de energía, en cuyo caso por monitoreo de la corriente consumida de la red, hacen que el

motor quede alimentado durante tiempo prolongado con una tensión no igual a la nominal, que significa en términos reales un switcheo permanente de los componentes electrónicos, obteniendo como resultado un aumento en el nivel de distorsión, que aunque no es significativo, si se adiciona al efecto que otras cargas puedan producir, hará que la distorsión armónica total sea elevada.

2.3.2.1 Espectro de armónicos para diferentes instantes de la variación de tensión.

Para tener una idea de la distorsión armónica consecuente con en switcheo del arrancador suave se mostrará el espectro de armónicos con magnitudes superiores al 3% del valor rms de tensión en ese instante, se asume los valores inferiores a este porcentaje como ceros. Esto se llevará a cabo para cinco instantes de la etapa de arranque para la variante de control de tres fases conectada en línea, se inicia con la tensión de arranque la cual se define en 200 Vrms y se finaliza con la señal completa sin bypass.

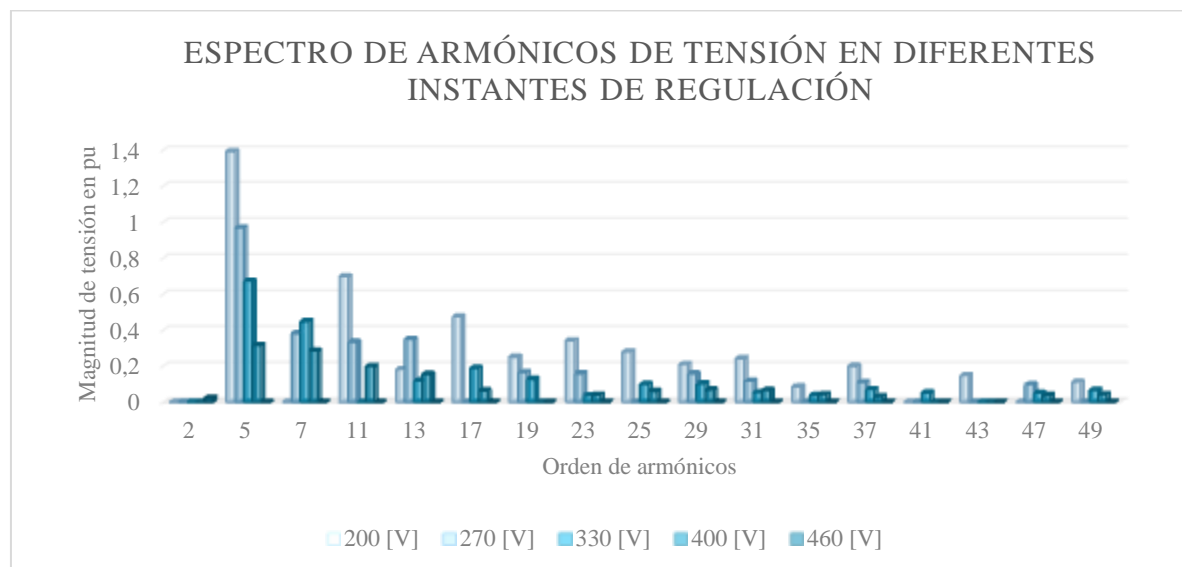


Figura 22. Espectro de armónico en diferentes instantes de regulación (200, 270, 330, 400 y 460 Vrms)

En la Tabla 8 se presenta un resumen de las ilustraciones anteriores con los porcentajes respecto al valor rms del instante de regulación.

Tabla 8.
Porcentaje de los armónicos de tensión en diferentes instantes de regulación.

Instante de regulación de tensión	Porcentaje de los armónicos respecto de la tensión del instante de regulación.												THDV
	Fundamental	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	37	
200 Vrms	47	65	---	33	9	23	12	16	13	10	11	10	178%
270 Vrms	62	60	24	20	22	---	10	10	---	10	7	7	121%
330 Vrms	73	49	33	---	9	14	9	3	7	7	4	5	89%
400 Vrms	87	27	25	17	13	6	---	4	6	6	6	3	53%
460 Vrms	99,6	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	2%

Nota: Los datos de esta tabla fueron obtenidos de la simulación del motor ejemplo; THDV = Distorsión armónica total de voltaje.

Tal como se mencionó, la distorsión armónica cuando el arrancador queda operando de forma continua es poco significativa por lo tanto no es necesaria la inclusión de filtros si el motor opera de forma continua y a tensión plena.

La inyección de armónicos a la red es consecuencia de los armónicos de la corriente por ello es importante el análisis del comportamiento de la corriente en función del tiempo y su distorsión armónica. En la Tabla 9 se resume los valores del espectro de armónico de la corriente.

Tabla 9.
Armónicos de corriente en diferentes instantes de regulación de tensión.

Instante de regulación de tensión	Armónicos de la corriente en [Ap]							THDI
	Fundamental	2	5	7	11	13	17	
200 Vrms ; 100 Ap	94,91	---	30,67	---	6,57	---	2,76	33%
270 Vrms ; 130 Ap	126	12,45	27,84	7,59	4,61	3,8	---	25%
330 Vrms ; 150 Ap	147	---	16	21	10	---	---	19%
400 Vrms ; 135 Ap	134	---	9,72	6,2	2,68	---	---	9%
460 Vrms ; 40 Ap	39,99	0,8	---	---	---	---	---	2%

Nota: Los datos de esta tabla fueron obtenidos de la simulación del motor ejemplo; THDI = Distorsión armónica total de corriente; Ap = Ampere pico.

Y en la Figura 23 se observa la corriente en función del tiempo asumiendo que no existe distorsión en el arranque y con un momento de inercia de 0,1kg·m² (Se utiliza un momento de inercia reducido con el propósito de disminuir el tiempo de arranque y obtener una imagen clara de la función)

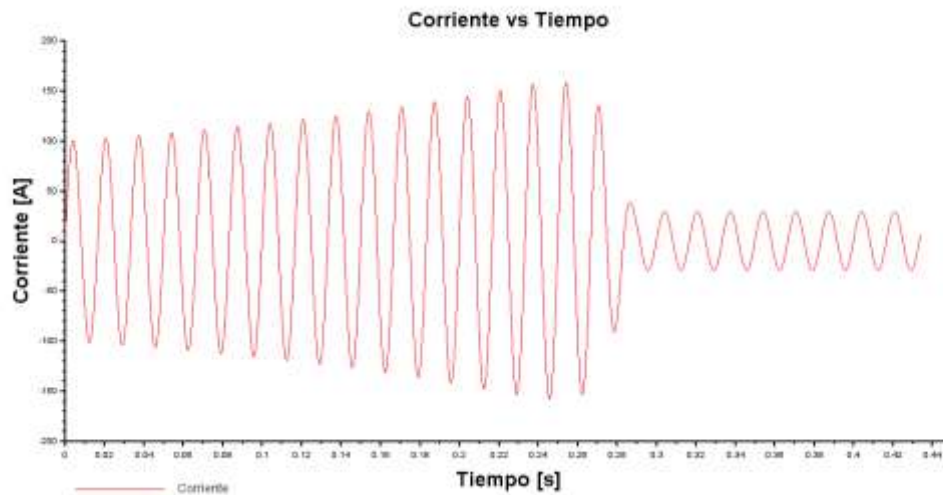


Figura 23. Corriente en función del tiempo para un arranque suave, sin tener en cuenta la distorsión armónica

2.4 Arranque y operación por medio de variador de frecuencia.

El convertidor de frecuencia es en última instancia, la mejor solución para un arranque continuo y sin escalones de motor asíncrono trifásico. La limitación de corriente ajustable evita los picos de corriente en el suministro de red eléctrica y repentinamente cargas en las partes mecánicas de la máquina y en los sistemas.

Además del arranque suave, el convertidor de frecuencia también permite el control de la velocidad (frecuencia) del motor, lo cual, permite que el motor pueda ser utilizados en todo el rango de velocidades, por ejemplo, desde 10V - 5Hz a 460V - 60Hz. La relación constante de voltaje / frecuencia (V/f) garantiza puntos independientes que operan con el par nominal de la carga.

El diagrama unifilar típico de la instalación eléctrica de motores de inducción accionado por medio de un variador de frecuencia se muestra en la Figura 24.

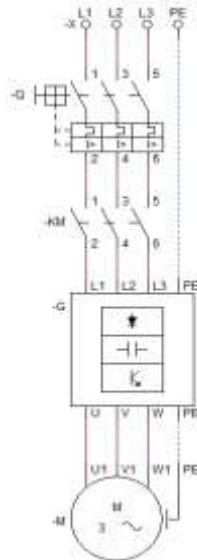


Figura 24. Diagrama multifilar de la instalación eléctrica de un motor de inducción accionado con un variador de frecuencia

2.4.1 Principio de funcionamiento de un variador de velocidad.

Un regulador electrónico de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable.

Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio (convertidor DC-DC) y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna. A esta segunda etapa también se le suele llamar inversor. Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de variador de frecuencia. El diagrama de bloques típico de un variador de velocidad se observa en la Figura 25.

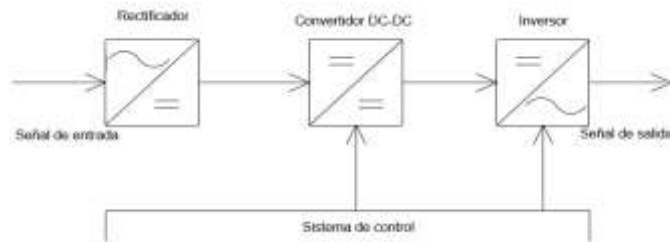


Figura 25. Diagrama de bloques de un variador de frecuencia.

La velocidad síncrona del motor en condiciones nominales se conoce como velocidad base. Si se utiliza el control de frecuencia variable, se puede ajustar la velocidad del motor por arriba o por debajo de la velocidad base. El controlador de la frecuencia variable de un motor de inducción debidamente diseñado puede ser muy flexible. Puede controlar la velocidad de un motor de inducción dentro de un intervalo que va desde tan poco como 5% de la velocidad base hasta el doble de ella. Sin embargo, es importante mantener ciertos límites en el voltaje y par del motor conforme se varía la frecuencia para asegurarse de que la operación es segura.

Durante el arranque, el variador aumenta gradualmente la frecuencia hasta alcanzar la frecuencia predeterminada para la operación. Si hiciéramos un análisis en varios puntos del arranque podríamos imaginar que para cada frecuencia instantánea que el variador aplica al motor este está girando a la velocidad nominal que corresponde a esa frecuencia aplicada, por lo tanto, el torque nominal va a estar disponible desde el arranque y la corriente absorbida de la red rondará la nominal. Podemos decir entonces que al arrancar un motor con un variador tenemos torque disponible aún con el motor detenido y que arranca a corriente nominal. De hecho, la mayoría de los variadores falla cuando la corriente del motor alcanza 1,5 veces la I nominal (Caputo, 2015). Con el fin de observar este comportamiento se simula el arranque a través de un variador de velocidad del motor modelo, con una rampa de arranque desde 3Hz hasta 100Hz y con una variación de tensión lineal. Dicha simulación se contempla en la Figura 26, en donde se

ve un par reducido y un pico de corriente a bajas velocidades (frecuencias menores al 10% de la frecuencia base), luego encontramos la región de par constante (frecuencias menores a la frecuencia base) y por último la región de debilitamiento del flujo (frecuencias mayores a la frecuencia base). Con el uso de variadores de velocidad con control avanzado por ejemplo control vectorial se puede eliminar la caída de par a bajas velocidades, por lo tanto, si se desea operar a frecuencias bajas es recomendable el uso de variadores con este tipo de tecnologías.

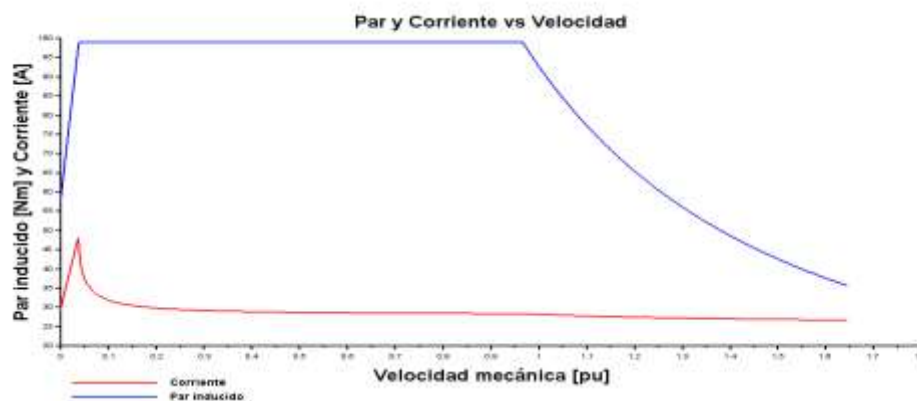


Figura 26. comportamiento de la corriente y par respecto de la velocidad, para un motor operado con un variador de velocidad

2.4.2 Comportamiento de las señales.

Tal como se mencionó anteriormente el variador de frecuencia está comprendido primordialmente por dos etapas, una etapa rectificadora y una etapa inversora, divididas por un bus de DC, por lo tanto, se puede realizar un análisis de las señales de entra y un análisis de las señales de salida independiente.

Existen diferencias topológicas en el esquema de un variador de frecuencia, las cuales dependen del número de polos de la etapa de rectificación y de los dispositivos de la electrónica

de potencia usados en todo el conjunto del convertidor, además de diferentes modelos de control. Las topologías comúnmente utilizadas para alimentar motores de inducción trifásicos difieren en la etapa de rectificación las cuales se listan a continuación:

- Convertidor AC-DC de seis pulsos – Convertidor DC-DC – Convertidor DC-AC trifásico.
- Convertidor AC-DC de doce pulsos – Convertidor DC-DC – Convertidor DC-AC trifásico.

Para utilizar el esquema de 12 pulsos se hace necesario la inclusión de un transformador hexafásico aguas arriba del convertidor de frecuencia. En la Figura 27 se observa la topología típica para un convertidor de frecuencia de 6 pulsos y un inversor de potencia con transistores IGBT de salida trifásica.

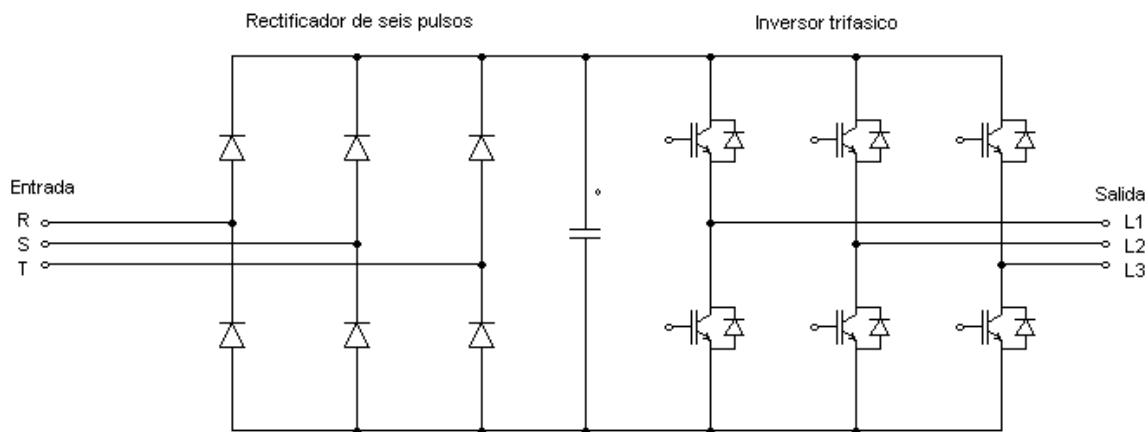


Figura 27. Topología de un convertidor de frecuencia de seis pulsos y salida trifásica.

2.4.2.1 Señales de entrada.

Estos equipos tienen una característica común absorber corriente del sistema no lineales, por lo tanto, presentan leyes comunes que permiten el análisis de su comportamiento, durante el funcionamiento de estos equipos aparecen armónicos de tensión y corriente en las redes, en los

rectificadores se generan armónicos tanto en el lado de continua como en el alterno donde las del lado de continua son del orden:

$$h = K * p \quad \text{Ecuación 4}$$

y las del lado de alterna son del orden:

$$h = k * p \pm 1 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

h = Orden de los armónicos.

p = Número de pulsos de rectificador.

k = Número entero positivo 1, 2, 3, ...

Los armónicos de interés son los armónicos del lado de alterna. Los porcentajes de armónicos de corriente típicos para los rectificadores de seis pulsos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.
Porcentaje típico de armónicos de corriente inyectados a la red por un rectificador de seis pulsos más inductancia en CA

Armónico	5	7	11	13	17	19	23	25	THD _i
%fundamental	20	14	9	7,5	6	5	4,3	4	28%

Cuando se utilizan rectificadores de 12 pulsos se reduce el número de armónicos, por lo tanto, la distorsión armónica de la señal de corriente inyectada a la red, en la Tabla 11 se muestra una aproximación típica del porcentaje de armónicos para esta configuración.

Tabla 11.
Porcentaje típico de armónicos de corriente inyectados a la red por un rectificador de doce pulsos

Armónico	11	13	23	25	35	37	THD _i
%fundamental	9	7,5	4,3	4	2,8	2,7	13,6%

Si se realiza una comparación entre estos dos tipos de configuración se llega a la conclusión lógica que es mejor el uso de un rectificador de 12 pulsos, pero esta solución trae consigo un costo adicional que debe ser evaluado y comparado con otras alternativas como implementar filtros de armónicos, no obstante la solución ideal es incluir en el sistema el conjunto filtro, transformador hexafásico y rectificador de doce pulsos, que representara una mejora significativa en la calidad de la energía eléctrica. En la

Figura 28 se muestra la forma de onda de corriente típica en la entrada de un variador de frecuencia de seis pulsos y de doce pulsos respectivamente.

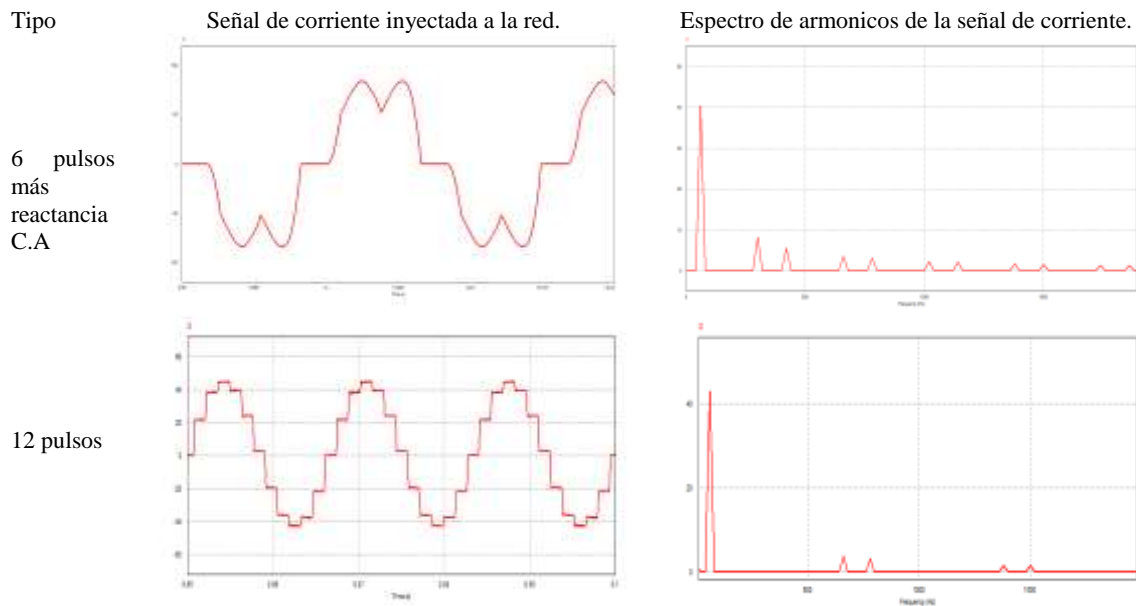


Figura 28. Señal de corriente y espectro de armónico de un rectificador de 6 y 12 pulsos

2.4.2.2 Señales intermedias.

La señal de salida de un rectificador presenta un porcentaje de rizado y niveles de tensión que dependen del tipo de rectificador y de los niveles de tensión rectificadas, estos valores de tensión

deben ser corregidos por medio de un capacitor y un sistema de regulación de tensión DC-DC para obtener los valores adecuados para la inversión de la señal. Los reguladores controlan la tensión modulando un elemento ya sea en serie o en paralelo. Este elemento por lo regular es un transistor.

2.4.2.3 Señales de salida.

Las señales reguladas por la etapa intermedia son inyectadas al inversor de tensión con el objeto de convertir la señal DC en una señal AC con frecuencia predeterminada. La topología típica se muestra en la Figura 27, donde se indica un esquema conformado por un conjunto de seis transistores de potencia, alimentados por una fuente de voltaje DC. La secuencia de conmutación que siguen los interruptores viene impuesta por un proceso previo de modulación que será el que determine las características de la señal de salida, entre ellas: forma, amplitud, frecuencia y contenido armónico. Actualmente existe gran variedad de técnicas de modulación utilizadas en el control de inversores trifásicos; una técnica empleada que deriva sus bases del área de las telecomunicaciones (Capitaneanu, 2001) es la modulación por ancho de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*). Dentro de esta técnica se han propuesto diversos algoritmos de modulación, cada uno pretendiendo mejorar alguna característica dentro del proceso, por ejemplo: las pérdidas por conmutación, la eficiencia de la conversión o el contenido armónico presente en la onda de salida. En los accionamientos eléctricos, esta última característica es de gran importancia debido a la cantidad de efectos indeseables que provocan las señales armónicas al atravesar los devanados del motor; entre ellos se destacan: distorsiones en la onda sinusoidal, reducciones del factor de potencia, incremento de las pérdidas en la máquina, sobrecalentamientos, vibraciones, reducción del par útil de la máquina y de la vida útil del motor.

Los parámetros que se deben tener en cuenta para el control de los interruptores de la etapa de inversión son los siguientes:

Señal portadora: Esta señal generalmente es periódica y su frecuencia está determinada por diversos criterios, tales como: el nivel de pérdidas por conmutación permitido, la velocidad de conmutación de los dispositivos semiconductores de la etapa de potencia y las regulaciones de compatibilidad electromagnética vigentes, entre otras (Holtz, 1994).

La señal moduladora: La señal moduladora contiene la información de amplitud, frecuencia y fase deseadas y por esta razón se conoce también como señal de referencia.

Índice de modulación de frecuencia: El índice de frecuencias relaciona la frecuencia de la señal portadora con la frecuencia de la señal moduladora tal como se describe en la siguiente ecuación.

$$m_f = \frac{f_s}{f_m} = \frac{\omega_s}{\omega_m} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

f_s = frecuencia de la señal portadora.

f_m = frecuencia de la señal moduladora.

m_f = índice de modulación de frecuencia.

Un alto índice de frecuencias permite obtener gran número de pulsos por periodo de la onda fundamental, ubicando a los armónicos indeseables en frecuencias altas y asegurando que su presencia no afecte considerablemente el comportamiento fundamental de la máquina; adicionalmente, al ubicar estos armónicos en altas frecuencias se facilita el diseño de los circuitos encargados de filtrarlos (Pardo, 2004)

El índice de modulación de amplitud: Una característica importante en la modulación PWM es el nivel de utilización del bus de DC y su indicador más común es el índice de modulación de amplitud m_a . Este índice se define como la amplitud de la señal moduladora, normalizada con respecto a la amplitud máxima de la portadora y se calcula como se indica en la Ecuación 7:

$$m_a = \frac{A}{v_{tri}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

A = amplitud de la señal moduladora.

V_{tri} = amplitud de a señal portadora.

Teniendo en cuenta los parámetros definidos procedemos a describir los componentes de armónicos para las siguientes técnicas de control.

Modo six step: La importancia del modo six-step radica en que con esta configuración es posible obtener la máxima utilización del voltaje de bus DC, sin embargo, esta técnica solo permite un control sobre la frecuencia de la señal fundamental y no sobre su amplitud.

Las señales de tensión y corriente de línea inyectadas a el motor modelo por un variador de frecuencia con un modo six step, se observan en la Figura 29, además del respectivo espectro de armónico. Los valores hallados en la simulación son similares a los valores obtenidos por otros autores.

Los porcentajes de armónicos de las señales de corriente y tensión inyectados al motor se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12.

Porcentaje de armónicos de tensión y corriente respecto a los valores fundamentales.

Orden de armónicos	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
% de la señal fundamental de tensión	20	14	9	7,5	5,8	5	4,3	4	3,3	3	2,7	2,6

% de la señal fundamental de corriente	72	26	13	9	3,6	5	3,3	3	2,3	1,5	1,4	1,1
--	----	----	----	---	-----	---	-----	---	-----	-----	-----	-----

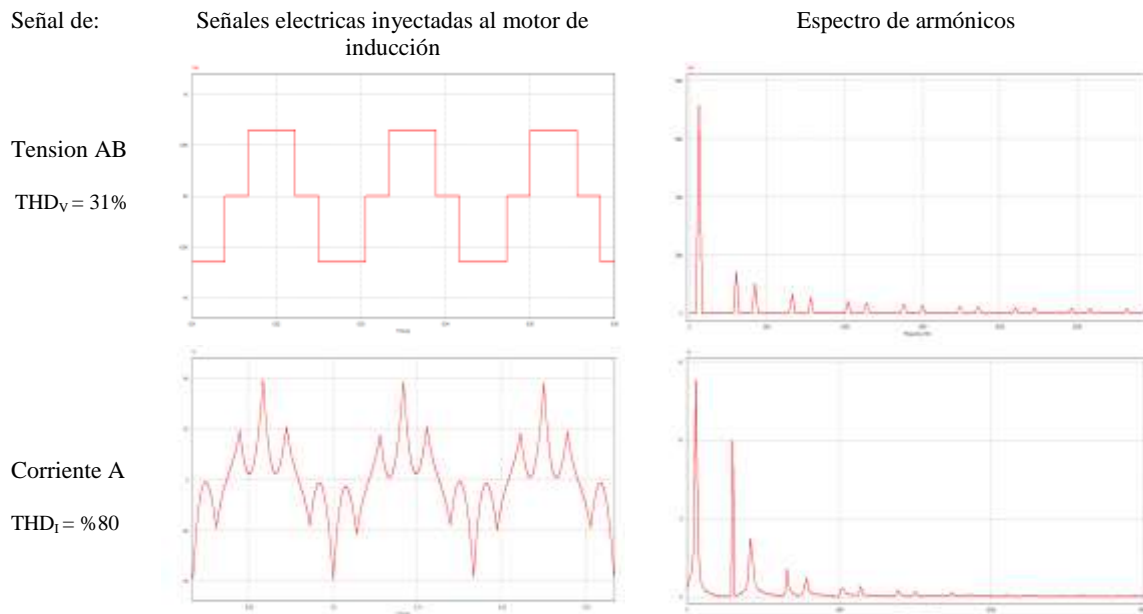


Figura 29. Señales de voltaje y corriente inyectadas al motor modelo por un variador de frecuencia con un control six step.

Modulación PWM sinusoidal (SPWM): En general, la SPWM es una técnica simple que garantiza buenos resultados en todas las condiciones de trabajo, incluida la sobremodulación ($m_a > 1$) y que presenta un buen desempeño armónico. Este buen desempeño se debe a su frecuencia de conmutación constante, que genera un espectro definido, con componentes en alta frecuencia y con reducción de armónicos de bajo orden. Por estas razones, las primeras versiones del método tuvieron gran aceptación en la industria, sin embargo, rápidamente se evidenció que la limitación en su rango lineal provocaba que los motores trabajaran con tensiones inferiores a las nominales, reduciendo así su desempeño (Bergas, 2000). En la 30 se presenta la relación entre el índice de modulación y la amplitud normalizada del voltaje de línea-línea

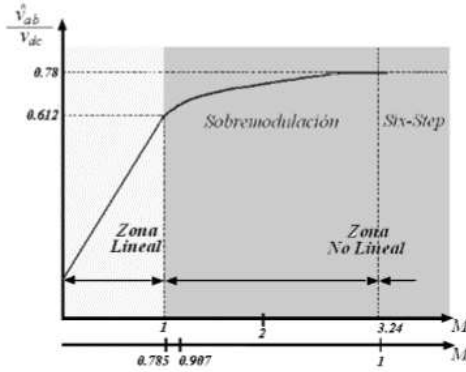
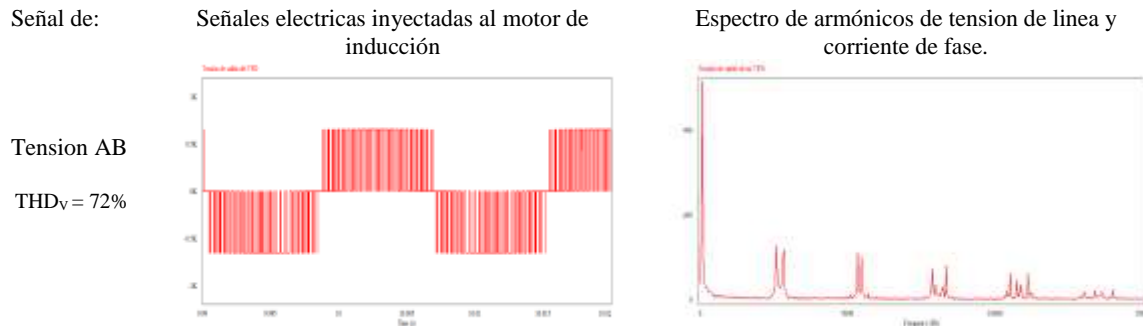


Figura 30. Relación del índice de modulación con el porcentaje de utilización del bus DC. Recuperado de Malinowski, M. Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers. Ph.D.Thesis, Institute of Control and Industrial Electronics. Faculty of Electrical Engineering. Warsaw University of Technology. Poland; 2001

En la figura se aprecia cómo el límite superior de la zona lineal del SPWM genera una utilización aproximada del 61.2% del bus DC. Más allá se encuentra la región de sobremodulación que permite una mayor utilización del bus DC a cambio de una no linealidad. Cuando el índice toma el valor 3.24 se alcanza el modo de operación six-step, generándose la máxima disponibilidad del bus DC, aproximadamente 78%.

En la Figura 31 se puede ver la forma de onda y el espectro de armónico de tensión y corriente inyectadas al motor modelo, por un variador de frecuencia con sistema de control de modulación SPWM y con una frecuencia de la señal portadora de 2700Hz.



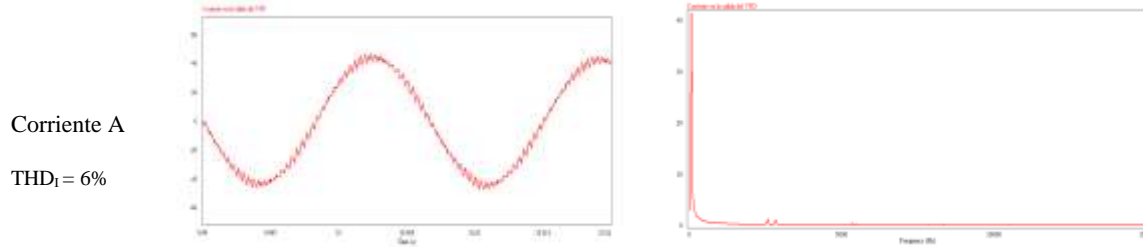


Figura 31. Señales de voltaje y corriente inyectadas al motor modelo por un variador de frecuencia con un control SPWM.

La amplitud de modulación incrementa/decrece linealmente en proporción a la profundidad de modulación (índice de amplitud, m_a), por otra parte, los armónicos aparecen en grupos con sus componentes principales a frecuencias de:

$$f_h = k * m_f * f_s \quad \text{Ecuación 8}$$

La amplitud de los armónicos cambia con m_a , esto no incide en la ubicación en el espectro. Para $m_f > 10$, los armónicos pueden ser normalizados, mientras que para valores más pequeños las bandas laterales de grupos de armónicos se sobreponen y los valores normalizados no aplican.

En la Tabla 13 se puede contemplar los valores normalizados de los armónicos de las tensiones de salía de un variador de frecuencia con control SPWM.

Tabla 13.
Armónicos normalizados para la tensión de salida de un variador de frecuencia con control SPWM con un índice de modulación de frecuencia mayor que diez.

Orden, n	Índice de amplitud, m_a				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
m_f	1,242	1,15	1,006	0,818	0,601
$m_f \pm 2$	0,016	0,061	0,131	0,220	0,318
$m_f \pm 4$					0,018
$2m_f \pm 1$	0,190	0,326	0,370	0,314	0,181
$2m_f \pm 3$		0,024	0,071	0,139	0,212
$2m_f \pm 5$				0,013	0,033
$3m_f$	0,335	0,123	0,083	0,171	0,113
$3m_f \pm 2$	0,044	0,139	0,203	0,176	0,062
$3m_f \pm 4$		0,012	0,047	0,104	0,157
$3m_f \pm 6$				0,016	0,044
$4m_f \pm 1$	0,163	0,157	0,008	0,105	0,068
$4m_f \pm 3$	0,012	0,07	0,132	0,115	0,009
$4m_f \pm 5$			0,034	0,084	0,119
$4m_f \pm 7$				0,017	0,050

Nota: Adaptado de Gonzales, L. Modulación de ancho de pulsos - Una introducción. IEEE; 2004

El espectro de las tensiones de línea es más limpio, no aparecen en este los armónicos múltiplos de tres y la amplitud es raíz de tres veces la magnitud de las tensiones de fase, entonces si m_f es elegido impar y divisible por tres, la forma de onda de voltaje de línea de salida presenta una menor distorsión armónica reduciendo a su vez el espectro de armónico de corriente (Con la ejecución del Código 8 del anexo B se puede observar el espectro de armónico para frecuencias de la señal portadora predeterminadas).

Es deseable empujar m_f al valor más alto posible. Cuando m_f es alto los armónicos estarán a muy alta frecuencia. Aunque la mejora en el THD de voltaje no es significativa, el THD de corriente se mejora en gran proporción debido a que la carga posee normalmente algún efecto de filtrado.

Si un filtro es ubicado a la salida del inversor, mejora el THD de voltaje, por lo tanto, es deseable obtener las armónicas a la frecuencia lo más alta posibles, para hacer los elementos del filtro de menor tamaño.

Existen otros métodos para el control de modulación por ancho de pulso tal como: El método SHE PWM (*Selected Harmonic Elimination PWM*), con el cual se puede eliminar los armónicos de bajo nivel, pero se amplifican los armónicos próximos más altos. el método de mínimo rizado de corriente, el método de control por banda histéresis de corriente, modulación sigma delta, modulación por vector espacial, entre otros.

3 Dimensionamiento de la instalación eléctrica para motores accionados por variadores de frecuencia.

En este capítulo se realiza un resumen de los estándares a seguir para la selección y dimensionamiento de los componentes que hacen parte de la instalación eléctrica de motores trifásicos de inducción accionados con variadores de frecuencia, teniendo como base el código eléctrico colombiano y otras normas.

Para el propósito de este documento se define los siguientes:

Compatibilidad electromagnética (CEM): Es la capacidad de un dispositivo o sistema, para funcionar en un entorno electromagnético sin que se vea afectada sus funciones y sin afectar las funciones de los demás dispositivos o sistemas del entorno (RETIE, 2013). Cualquier aproximación a la CEM implica un estudio por un sistema compuesto por tres elementos, el generador de perturbaciones o fuente, la propagación o acoplamiento y el elemento perturbado o víctima.

Debilitamiento del campo: Modo de operación de un motor en donde el flujo es menor al flujo para la característica nominal del motor (GTC 124, 2009).

De los sistemas de accionamientos de potencias (*Power Drive system, PDS*) descritos en el capítulo dos para el arranque y operación de motores de inducción, los sistemas accionados por medio de variadores de frecuencia generan la mayor cantidad de armónicos de tensión y corrientes inyectados al motor y transmitidos a la red en estado estacionario, es entonces el

variador el componente generador de perturbaciones electromagnética, lo cual reduce la capacidad de carga de los demás componentes de la instalación.

Limites operacionales según estándar IEEE 519 – 2014: Se debe tener en cuenta los límites de armónicos recomendados para el punto de acople común (*Point of Common Coupling*, PCC) por el estándar IEEE 519 – 2014. En el PCC, se deben limitar los armónicos de tensión de línea a neutro de la siguiente manera:

- Los valores diarios y tiempos muy cortos (3s) para el percentil 99 deberían ser menores a 1,5 veces los valores de la Tabla 14.
- Los valores semanales y tiempos cortos (10 min) para el percentil 95 deben ser menores a los valores de la Tabla 14.

Tabla 14.
Límite de distorsión de voltaje.

Bus de voltaje en PCC	Armónico individual %	Distorsión armónica total THD
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1	1,5

Nota: Adaptado de IEEE 519-2014.

Los límites para los armónicos de corrientes se definen en la Tabla 15 y se deben considerar teniendo en cuenta los siguientes percentiles.

- Los valores diarios y tiempos muy cortos (3s) para el percentil 99 deben ser inferiores a 2 veces los valores de la tabla.
- Los valores semanales y tiempos cortos (10 min) para el percentil 99 deben ser inferiores a 1,5 veces los valores de la tabla.
- Los valores semanales y tiempos cortos (10 min) para el percentil 95 deben ser inferiores a los valores de la tabla.

Tabla 15.
Límite de distorsión de corriente (120 a 69 kV)

Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de I_L						
Orden de los armónicos individuales						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 111$	THD ₁
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Nota: adaptado de IEEE 519-2014.

I_{sc} : Máxima corriente de cortocircuito en PCC.

I_L : Máxima demanda de corriente de carga (Componente fundamental de frecuencia) en PCC.

A parte de la instalación eléctrica del motor de inducción no se tiene conocimientos de otras cargas conectadas en el PCC, definimos este como el punto de acople de la instalación del motor con la línea del alimentador.

Corriente de cortocircuito: Cualquier instalación eléctrica debe estar protegida contra los cortocircuitos y esto, salvo excepción, en cada punto que se presenta una discontinuidad eléctrica, lo que corresponde casi siempre con un cambio de sección de los conductores. La intensidad de la corriente de cortocircuito debe calcularse para cada uno de los diversos niveles de la instalación para poder determinar las características de los componentes que deberán soportar o cortar la corriente de defecto. Para elegir y regular convenientemente las protecciones se utilizan las curvas de intensidad en función del tiempo (Figura 32). Es necesario conocer dos valores de corriente de cortocircuito (Metz, Dumes, & Thomasset, 2000)

- La corriente máxima de cortocircuito, que determina:
 - El poder de corte -PdC- de los interruptores automáticos.
 - El poder de cierre de los dispositivos de maniobra.
 - La sollicitación electrodinámica de conductores y componentes.

El valor corresponde a un cortocircuito inmediatamente aguas abajo de los bornes del elemento de protección. Debe calcularse con una buena precisión.

- La corriente mínima de cortocircuito, indispensable para elegir la curva de disparo de los interruptores automáticos y de los fusibles especialmente cuando:
 - La longitud de los cables es importante y/o la fuente o generador es relativamente de alta impedancia.
 - La protección de las personas se basa en el funcionamiento de los interruptores automáticos o de los fusibles, como es el caso concreto de los sistemas de distribución con los esquemas de conexión a tierra del neutro (o regímenes de neutro) TN o IT.

Recordemos que la corriente mínima de cortocircuito corresponde a un cortocircuito producido en el extremo de una derivación protegida, cuando se produce un defecto bifásico en las condiciones de explotación menos severas (como por ejemplo ante un defecto alejado de la protección en el extremo de una línea.

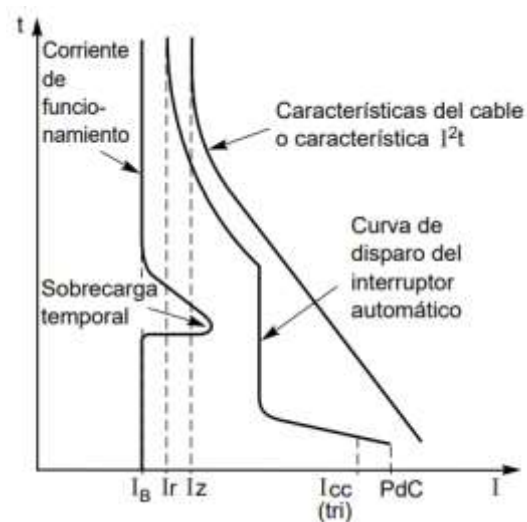


Figura 32. Protección de un circuito por interruptor automático. Recuperado de Cuaderno Técnico Schneider nº

158 / p. 7

Donde:

I_r : Es el calibre del interruptor.

I_B : Corriente de empleo.

I_z : Intensidad admisible por el conductor

I_{cc} : Intensidad de cortocircuito trifásica

PdC: Poder de corte del interruptor.

Existen diferentes métodos para el cálculo de la corriente de cortocircuito entre estos podemos encontrar:

- El método de las «impedancias», que permite calcular las corrientes de defecto en cualquier punto de una instalación, con una precisión aceptable.
- El método de «composición», que se puede utilizar cuando no se conocen las características de la alimentación. La impedancia aguas arriba del circuito, considerado se calcula a partir una estimación de la corriente de cortocircuito en su origen.
- El método llamado «convencional», que permite calcular las corrientes de cortocircuito mínimas y las corrientes de defecto en el extremo de una red, sin conocer las impedancias o la I_{cc} de la instalación aguas arriba del circuito considerado. Este método se usa sobre todo para los circuitos finales.
- El método llamado «simplificado» que utiliza una tabla con diversas hipótesis simplificadas.

Para efectos de este proyecto se utiliza el método convencional, partiendo que se desconoce las impedancias del circuito de alimentación a la red (impedancias de red de distribución, del transformador y acometidas), se asume que la tensión en el origen del circuito durante el fallo es igual al 80% de la tensión nominal de la instalación.

$$I_{CC} = \frac{0,8 * U * FC1 * FC2}{1,5 * \rho * \frac{2L}{S}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$FC2 = 4 * \frac{n - 1}{n} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

I_{CC} : Corriente de corto circuito para sistemas con neutro no distribuido.

U: Tensión de alimentación de línea [V]

ρ : Resistividad del material. [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]

L: Longitud de la línea protegida [m]

S: Sección transversal del conductor en [mm^2]

FC1: Factor de corrección para considerar la reactancia de los cables con sección superior a 95 mm^2 . Este factor se indica en la Tabla 16.

FC2: Factor de corrección para los conductores en paralelo. Este factor se calcula de acuerdo con la Ecuación 10.

n: Número de conductores en paralelo por fase.

Tabla 16.

Factor de corrección para considerar la reactancia de los cables.

S [mm^2]	120	150	185	240	300
FC1	0,9	0,85	0,8	0,75	0,72

Nota: Datos extraídos de tabla 5.8 de Trashorras, M. Sistemas eléctricos en centrales. Ediciones Paraninfo, SA; 2016

La corriente mínima de cortocircuito debe ser 1,2 veces la corriente magnética del dispositivo de protección.

3.1 Dimensionamiento y factores de corrección de la capacidad de carga.

Si partimos de la capacidad nominal de un motor para determinar los conductores, interruptores, dispositivos de protección contra cortocircuito y falla a tierra etc., se deben usar los valores de la Tabla 17 en lugar de la corriente nominal rotulada en la placa característica del motor, pero la protección independiente del motor contra sobrecarga se debe calcular de acuerdo con la corriente nominal rotulada en la placa del motor.

Cuando se utiliza algún sistema de variación de potencia la capacidad nominal de los conductores o dispositivos de protección del circuito ramal contra cortocircuito y falla a tierra se debe basar en la capacidad máxima de funcionamiento rotulado en la placa característica del motor o el controlador, si dicha capacidad no se encuentra en la placa característica el valor debe ser 1,5 los valores de la Tabla 17.

Tabla 17.
Corrientes a plena carga de motores trifásicos de inducción.

POTENCIA DEL MOTOR		NIVELES DE TENSIÓN EN VOLTIO						
HP	kW	115	200	208	230	460	575	2300
½	0,373	4,4	2,5	2,4	2,2	1,1	0,9	
¾	0,560	6,4	3,7	3,5	3,2	1,6	1,3	
1	0,746	8,4	4,8	4,6	4,2	2,1	1,7	
1 ½	1,119	12,0	6,9	6,6	6,0	3,0	2,4	
2	1,492	13,6	7,8	7,5	6,8	3,4	2,7	
3	2,238		11,0	10,6	9,6	4,8	3,9	
5	3,730		17,5	16,7	15,2	7,6	6,1	
7 ½	5,595		25,3	24,2	22	11	9	
10	7,460		32,2	30,8	28	14	11	
15	11,19		48,3	56,2	42	21	17	
20	14,92		62,1	59,4	54	27	22	
25	18,65		78,2	74,8	68	34	27	
30	22,38		92	88	80	40	32	
40	29,84		120	114	104	52	41	
50	37,30		150	143	130	65	52	

60	44,76	177	169	154	77	62	16
75	55,95	221	211	192	96	77	20
100	74,60	285	273	248	124	99	26
125	93,25	359	343	312	156	125	31
150	111,90	414	396	360	180	144	37
200	149,20	552	528	480	240	192	49
250	186,50				302	242	60
300	223,80				361	289	72
350	261,10				414	336	83
400	298,40				477	382	95
450	335,70				515	412	103
500	373,00				590	472	118

Nota: Los datos de esta tabla fueron extraídos de la tabla 430-150 de la NTC 2050. Código eléctrico colombiano. Bogotá, D.C. : ICONTEC. 1998

3.1.1 Criterios de dimensionamiento y factores de corrección de los motores de inducción.

Cuando se requiere dimensionar un motor es necesario de-ratear los parámetros de operación de acuerdo con los factores ambientales, sin embargo, si se incluyen en el PDS sistemas no lineales se somete al motor a variaciones en la fuente de potencia, lo cual, afectaría su funcionamiento y características de operación, por tal motivo es importante aplicar un factor de corrección y obtener un valor estimado de la capacidad de carga de un motor bajo la influencia de señales distorsionadas. No realizar esta acción expone al motor a operar con sobrecarga, lo cual reduce la confiabilidad del motor y del PDS a menos que el motor este sobredimensionado con antelación.

3.1.1.1 Corrección por altitud y temperatura

La altitud en un motor instalado juega un papel importante en sus características de potencia y operación. La NEMA MG-1 define como nivel del mar la siguiente altitud; 3300 pies (1000 metros) o menos. A medida que aumenta la altitud, la densidad del aire disminuye por lo cual la cantidad de transferencia de calor del motor se reduce. Existen dos situaciones para el de-rateo de potencia en motores a causa del incremento de altitud:

- Disminuir la temperatura ambiente para mantener la misma elevación de temperatura y potencia del motor
- Disminuir la elevación de temperatura del motor y potencia para mantener los mismos 40°C de temperatura ambiente.

La NEMA MG-1 sección 14.4.1, especifica las máximas temperaturas ambiente para altitudes por encima del nivel del mar que permiten que los motores mantengan su potencia. en la Tabla 18 se muestra la temperatura ambiente que compensa el incremento de temperatura.

Tabla 18.

Temperaturas ambientes que compensan el aumento de temperatura por altitud

Altitud máxima [m]	Temperatura ambiente [°C]
1000	40
2000	30
3000	20

Nota: Adaptado de la NEMA MG1. Motor and Generator. National Electrical Manufacturers Association; 2016

Una advertencia de la sección 14.4.2 de la NEMA es que los motores con un factor de servicio 1.15 o superior pueden operar con un factor de unidad a temperatura ambiente de 40°C en altitudes superiores a 3300 pies (1000 m) hasta los 9000 pies (2740 m) de altitud.

La temperatura ambiente también juega un papel importante para el dimensionamiento de los motores, normalmente se dimensionan los parámetros nominales de los dispositivos eléctricos para funcionar a una temperatura ambiente de 40°C, por lo tanto, las instalaciones para motores con valores de temperatura ambiente superiores o inferiores de la temperatura ambiente nominal requiere de un factor de corrección por temperatura. En la Tabla 19 se observa los valores de corrección por temperatura y altitud.

Tabla 19.

Factor de de-rateo por altitud y temperatura ambiente

Altitud sobre el nivel del mar [m]	Temperatura ambiente [°C]						
	30	35	40	45	50	55	60
1000	1,06	1,03	1	0,96	0,92	0,87	0,82
1500	1,03	1	0,97	0,93	0,89	0,84	0,80

2000	1	0, 97	0, 94	0, 90	0, 86	0, 82	0, 77
2500	0, 95	0, 93	0, 90	0, 86	0, 83	0, 78	0, 74
3000	0, 91	0, 89	0, 86	0, 83	0, 79	0, 75	0, 71
3500	0, 87	0, 84	0, 82	0, 79	0, 75	0, 71	0, 67
4000	0, 82	0, 79	0, 77	0, 74	0, 71	0, 67	0, 63

Nota: Adaptado de Application manual for NEMA motors (2008), www.industry.usa.siemens.com

3.1.1.2 Corrección por presencia de armónicos.

Cuando el motor funciona a condiciones nominales y la tensión aplicada al motor contiene componentes de frecuencias distintas de la frecuencia fundamental, la potencia nominal del motor debe ser multiplicada por el factor que se indique en la Figura 33 para reducir la posibilidad de daños en el motor. Esta curva es desarrollada bajo el supuesto de que solo los armónicos igual a múltiplos impares (excepto los divisible por tres los cuales son homopolares y circulan por el neutro) de la frecuencia fundamental están presentes. Se supone que cualquier desequilibrio de tensión o cualquier armónico par, o ambos, presentes en la tensión son insignificantes. Esta curva de reducción de potencia no está destinada a aplicarse cuando el motor está operado a frecuencia diferente de la nominal, ni cuando se opera a partir de un variador de tensión o variador de frecuencia o ambos.

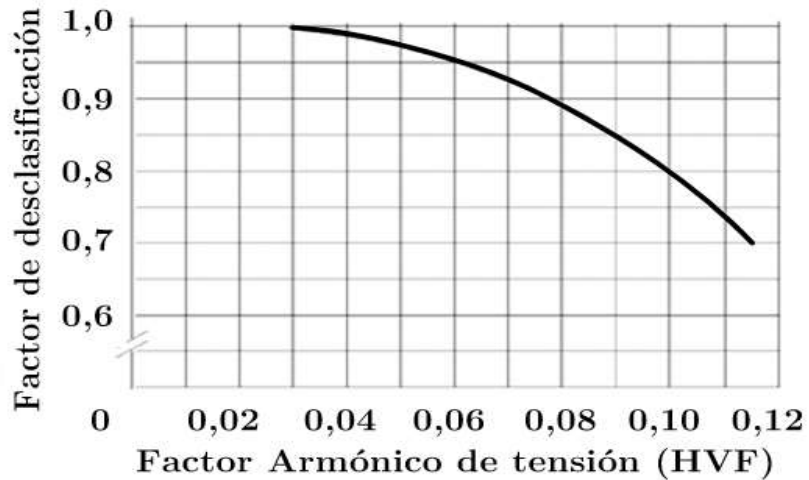


Figura 33. Curva de ajuste de potencia. Recuperado de NEMA MG-1

Para definir el factor de corrección por armónicos es necesario hallar el factor de tensión armónica el cual se define en la Ecuación 11.

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{n}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Siendo:

n: El orden de los armónicos impares sin incluir los divisibles por tres.

V_n: La magnitud por unidad de la tensión del n-ésimo armónico.

Con el objeto de ratear la capacidad de un motor por presencia de armónicos producto de un variador de frecuencia con sistema de control SPWM, se asume que el índice de modulación (ma) es igual a 1,0, la frecuencia fundamental es la frecuencia base y que el orden del armónico de la frecuencia de la señal portadora (fs) es divisible por 3,0. En la Figura 34 se observa el

factor armónico de tensión en función de la frecuencia de modulación para las asunciones descritas.

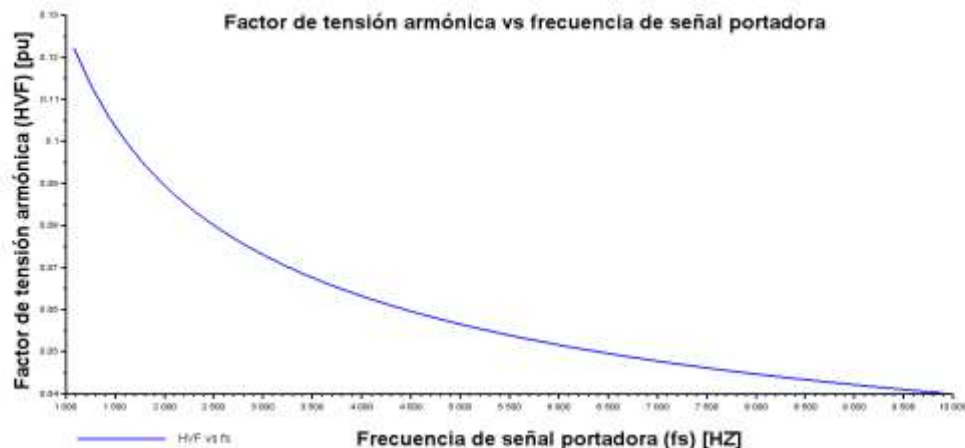


Figura 34. Factor armónico de tensión vs frecuencia de la señal portadora. Curva calculada teniendo en cuenta los valores normalizados de la Tabla 13.

De la curva anterior se obtiene el valor de HVF según la frecuencia de la señal portadora y de la curva de la Figura 33 el factor de corrección que se utilizará para el ajuste de la potencia del motor.

3.1.1.3 Corrección por cambios en el sistema de refrigeración.

Cuando se ejecuta el accionamiento del motor a través de un variador de frecuencia se debe considerar que los parámetros de operación difieren de los parámetros de diseño del motor, además que la refrigeración convencional de un motor suele provenir del propio motor mediante un ventilador acoplado al rotor y si se trabaja a bajas velocidades se reduce la capacidad de auto-ventilación por esto, se debe instalar refrigeración forzada, de-ratear la capacidad del motor o seleccionar un motor con mayor capacidad nominal.

En todos los casos (auto-ventilación, refrigeración forzada o sobredimensionamiento) el par está limitado térmicamente en el rango de debilitamiento del campo. En la siguiente figura se muestra las pérdidas de capacidad típicas de un motor cuando trabaja a velocidades diferentes de la nominal.

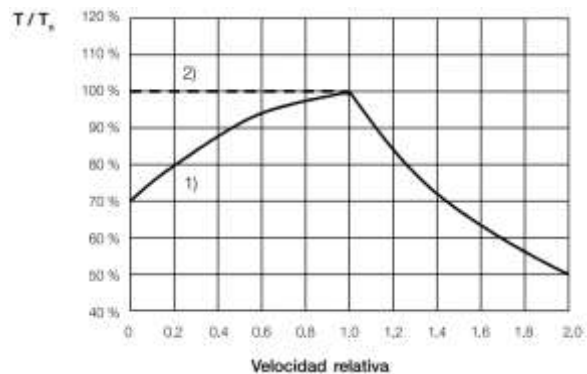


Figura 35. Capacidad de carga típica de un motor de inducción por jaula estándar en un accionamiento controlado por frecuencias 1) sin refrigeración independiente y 2) con refrigeración independiente. Recuperado de Guía técnica No 7 - ABB

Cuando se utilizan convertidores multinivel lo cual indica que tiene más de un interruptor (IGBT u otro dispositivo de conmutación) en cada derivación del puente del inversor conectado en serie. Por ejemplo, para un convertidor de tres niveles, la tensión entre líneas se puede ampliar en 5 valores diferentes (-Ud, - 1/2 Ud, 0, 1/2 Ud, Ud) en lugar de solamente tres valores (-Ud, 0, Ud) posibles para convertidores de dos niveles. Por una parte, permite una mejor forma de onda de la tensión de salida, reduciendo las corrientes armónicas (aproximadamente en un 50% por cada incremento en el nivel).

3.1.2 Criterios de dimensionamiento y factores de corrección de los conductores eléctricos.

Cuando se utilizan variadores de velocidad con modulación por ancho de pulso para alimentar motores eléctricos, se pueden producir sobretensiones momentáneas en los terminales del motor producto de las ondas reflejadas en la interfaz entre el cable y los terminales del motor debido al desajuste de la impedancia lo cual depende de la salida del convertidor, la longitud del cable entre el convertidor y el motor y la impedancia del terminal del motor.

Las sobretensiones se reducen en el caso de instalaciones que usan topologías descentralizadas (convertidores instalados cerca de los motores asociados), en donde la longitud del cable entre el convertidor y el motor es corta. Cuando las probabilidades de un sistema descentralizado son bajas una alternativa para reducir el esfuerzo de tensión es utilizar cables con pérdidas dieléctricas mayores y/o instalar un reactor en la salida.

Para niveles de potencia de más de 30 kW, pueden ser benéfico los cables en donde los conductores de potencia monoplares y los conductores de tierra están dispuestos simétricamente tal como se observa en la Figura 36.

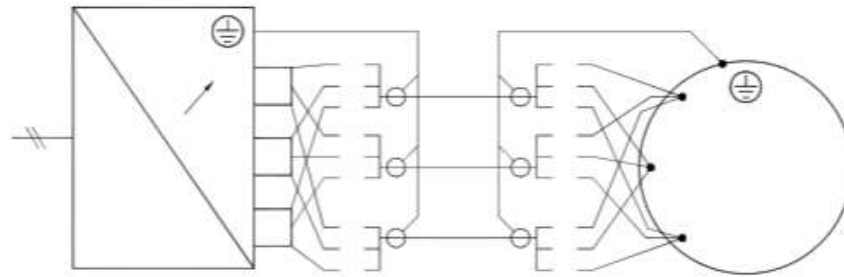


Figura 36. Cableado simétrico paralelo. Recuperado de GTC 124. Maquinas eléctricas rotatorias. Guía para el diseño y desempeño de motores de corriente alterna diseñados específicamente para la alimentación mediante convertidores. Bogota D.C: ICONTEC; 2009

Los cables multi-núcleos apantallados se prefieren para potencias más bajas y por su fácil instalación, aunque existen diseños de cables multi-núcleos para uso exclusivo de sistemas con variadores de velocidad para niveles de potencia mayores a 30 kW. En la Figura 37 se observa un ejemplo de este tipo de diseño los cuales poseen las siguientes características:

- (1) Conductor de cobre extraflexible.
- (2) Aislamiento termoestable 90°C en XLPE o EPR.
- (3) Conductor de tierra distribuido simétricamente en tres conductores de calibre 1/3 del área total del calibre de tierra.
- (4) Cubierta interna de PVC retardante a la llama (FR).
- (5) Pantalla en cinta de cobre o malla de cobre estañada o sin estañar.
- (6) Chaqueta de PVC resistente a aceites, a rayos UV y aptos para instalación en bandejas.

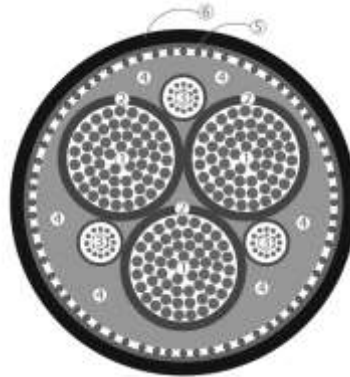


Figura 37. Diseño de cable exclusivo para variadores de frecuencia. Recuperado de CENTELSA. CABLES & TECNOLOGÍA BOLETÍN TÉCNICO - NOVIEMBRE 2012. CABLES PARA MOTORES CON VARIADORES DE FRECUENCIA VDF; 2012. Extraído de www.centelsa.com.co.

La selección de los conductores del circuito ramal en el lado del suministro del controlador se debe basar en la mayor de las corrientes nominales que aparezcan en la placa característica del PDS o el 1,5 de los valores de la Tabla 17 si no se conocen los valores de placa. La selección de los conductores del circuito ramal entre el controlador y el motor se debe basar en la corriente nominal del devanado o devanados que energicen esos conductores.

3.1.2.1 *Corrección por temperatura.*

Todos los componentes eléctricos están diseñados para alcanzar una temperatura de régimen nominal considerando una temperatura del entorno estándar. Cambios en la temperatura ambiente modifica la temperatura de régimen del componente y su capacidad de carga, el cableado eléctrico no es la excepción, por tal motivo debe ser desclasificados para operar en condiciones nominales, cuando las condiciones de operación son diferentes a las condiciones para lo cual fueron diseñados. Para estimar la temperatura del entorno de operación se debe considerar la temperatura ambiente del lugar y las condiciones o disposiciones del cableado, no es lo mismo operar al aire libre que en ductos, por lo tanto, se debe aplicar un factor de

corrección por agrupamiento además del factor de corrección por temperatura del entorno. Los factores de corrección por temperatura se encuentran en la Tabla 20.

Tabla 20.
Factores de corrección por temperatura.

Temperatura ambiente en °C	Temperatura máxima de operación del conductor		
	60°C	75°C	90°C
21-25	1,08	1,05	1,04
26-30	1,00	1,00	1,00
31-35	0,91	0,94	0,96
36-40	0,82	0,88	0,91
41-45	0,71	0,82	0,87
46-50	0,58	0,75	0,82
51-55	0,41	0,67	0,76
56-60	0,58	0,71
61-70	0,33	0,58
71-80	0,41

Nota: Adaptado de NTC 2050. Código eléctrico colombiano (NTC 2050). Bogotá, D.C. : ICONTEC; 1998

Cuando hay más de tres conductores portadores de corriente en un cable o canalización la capacidad de corriente se debe reducir tal como lo indica la Tabla 21.

Tabla 21. Factores de corrección por agrupamiento de conductores en cables o canalizaciones.

Número de conductores portadores de corriente.	Porcentaje de corrección por agrupamiento.
4 – 6	80
7 – 9	70
10 – 20	50
21 – 30	45
31 – 40	40
Mayor e igual a 41	35

Nota: Adaptado de NTC 2050. Código eléctrico colombiano (NTC 2050). Bogotá, D.C. : ICONTEC; 1998

3.1.2.2 Corrección de capacidad de los conductores por efecto piel en presencia de armónicos.

El factor de efecto piel (k) depende de la profundidad superficial, que es un indicador de la penetración de la corriente en un conductor. La profundidad superficial (δ) es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia (Sankaran, 2001):

$$\delta = \frac{s}{\sqrt{f}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

s : Es la constante de proporcionalidad sobre la base de las características físicas del cable y su permeabilidad magnética.

f : Es la frecuencia de la corriente que atraviesa el conductor.

Si R_{dc} es la resistencia de corriente continua del cable, entonces la resistencia de corriente alterna a la frecuencia f , está dada por:

$$R_{ac} = K * R_{dc} \quad \text{Ecuación 13}$$

El valor de K se determina a partir de la Tabla 22 de acuerdo con el valor de X , calculado según la Ecuación 14.

$$X = 0,0636 * \sqrt{\frac{f * \mu}{R_{dc}}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde 0,0636 es una constante para conductores de cobre, f es la frecuencia, μ es la permeabilidad magnética del material conductor y R_{dc} es la resistencia de corriente continua por milla del conductor. La permeabilidad magnética de un material no magnético tal como el cobre es aproximadamente igual a 1,0.

Tabla 22.
Factor de efecto piel para cualquier tipo de conductor

X	K	X	K	X	K	X	K	X	K	X	K
0	1	0,8	1,00212	1,5	1,02558	2,1	1,11126	2,9	1,28644	3,6	1,52879
0,1	1	0,9	1,00340	1,6	1,03323	2,3	1,13069	3	1,31809	3,7	1,56587
0,2	1	1	1,00519	1,7	1,04205	2,4	1,15207	3,1	1,35102	3,8	1,60312
0,3	1,00004	1,1	1,00758	1,8	1,05240	2,5	1,17538	3,1	1,38504	3,9	1,64051
0,5	1,00032	1,2	1,01071	1,9	1,06440	2,6	1,20056	3,3	1,41999		
0,6	1,00067	1,3	1,01470	2	1,07816	2,7	1,22753	3,4	1,45770		
0,7	1,00124	1,4	1,01969	2,1	1,09375	2,8	1,26620	3,5	1,49202		

Nota: Adaptado de Sankaran. Power Quality. CRC PRESS; 2001

La relación de la resistencia del cable a una frecuencia dada con respecto a su resistencia de 60 Hz se define como la relación de efecto piel (E).

$$E_n = \frac{R_n}{R_1} \quad \text{Ecuación 15}$$

Por lo tanto, puede formularse una expresión para el factor corrección para conductores. El factor de corrección (q) debe multiplicar a al valor RMS de la corriente del sistema, obteniendo de esta forma una expresión de corriente equivalente que será usada para la selección del cable.

$$q = \sum_0^n E_n * i_n^2 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$I_{RMS q} = I_{RMS} * q \quad \text{Ecuación 17}$$

En donde: $I_{RMS q}$: Es el valor de corriente requerido para el dimensionamiento del cable.

3.1.3 Criterios para el dimensionamiento de la protección contra sobrecarga del motor.

Todos los motores en servicio continuo de más de 746 W (1hp) deben estar protegidos contra sobrecarga por dispositivo independiente de protección contra sobrecarga que sean sensibles a la corriente del motor, programado con valores no menores al siguiente porcentaje de la corriente nominal por placa característica del motor de-rateada según valores de la sección 3.1.1.

Tabla 23.

Criterios para selección o ajuste de valores de corriente permisible por el dispositivo de protección contra sobrecarga

Criterios	Porcentaje de la corriente nominal.
Factor de servicio > 1,5	125%
Aumento de temperatura rotulado > 40°C	125%
Todos los demás	115%

Nota: Adaptado de NTC 2050. Código eléctrico colombiano (NTC 2050). Bogotá, D.C: ICONTEC; 1998

Si el relé seleccionado no es el adecuado para arrancar el motor o soportar la carga se permite utilizar el relé de tamaño inmediatamente superior siempre que la corriente del relé no sobrepase los siguientes porcentajes.

Tabla 24

Criterios para selección o ajuste de valores máximos de corriente permisible por el dispositivo de protección contra sobrecarga si los valores de la Tabla 23 son inadecuados para el arranque u operación de la máquina.

Criterios	Porcentaje de la corriente nominal.
Factor de servicio > 1,5	140%
Aumento de temperatura rotulado > 40°C	140%
Todos los demás	130%

Nota: Adaptado de NTC 2050. Código eléctrico colombiano (NTC 2050). Bogotá, D.C: ICONTEC; 1998

Si se utiliza un relé de sobrecarga de mayor clase se puede evitar la selección de una corriente de disparo mayor.

Además del relé térmico, existen otros mecanismos de protección contra sobrecargas, como el protector térmico integrado con el motor, diseñado para evitar sobrecalentamientos causados por sobrecarga debido a fallas en el arranque. Las corrientes máximas permisibles por este dispositivo no deben ser mayor a los siguientes porcentajes de la corriente del motor a plena carga.

Tabla 25.

Criterios para selección o ajuste de valores máximos de corriente permisible por el dispositivo de protección integrado al motor contra sobrecarga por fallas en el arranque.

Criterios	Porcentaje de la corriente nominal.
Corriente del motor a plena carga < 9 A	170%
Corriente del motor a plena entre 9,1 y 20 A	156%
Corriente del motor a plena carga > 20 A	140%

Nota: Adaptado de NTC 2050. Código eléctrico colombiano (NTC 2050). Bogotá, D.C: ICONTEC; 1998

Se permite instalar un dispositivo de protección integrado al motor que lo proteja contra danos debidos a fallas en el arranque si el motor forma parte de un conjunto aprobado que normalmente no someta el motor a sobrecargas.

Para motores de más de 1119 kW (1500 hp), se debe incorporar al dispositivo sensores de temperatura que permitan la interrupción del paso de la corriente cuando la temperatura del motor se eleve por encima de la rotulada en la placa característica.

3.1.4 Criterios para el dimensionamiento de protección de circuitos ramales de motores contra cortocircuito y falla a tierra.

El dispositivo de protección del circuito ramal del motor, contra cortocircuito y falla a tierra, debe ser capaz de conducir la corriente de arranque del motor que en el caso de variadores de frecuencia esta corriente es aproximadamente igual a la corriente nominal del motor.

3.1.4.1 Capacidad nominal o ajuste

Se debe emplear un dispositivo con una capacidad nominal o ajuste de disparo que no supere el valor calculado de acuerdo con los datos de la Tabla 26.

Tabla 26.

Capacidad máxima o ajuste de disparo de los dispositivos de protección para circuitos ramales de motores contra cortocircuito y falla a tierra.

Tipo de motor	En porcentaje de la corriente a plena carga			
	Fusible sin retardo de tiempo	Fusible con retardo de tiempo	Interruptores automáticos de disparo instantáneo (Interruptor magnético).	Interruptores automáticos de tiempo inverso (interruptor termomagnético)
Jaula de ardilla	300	175	800	250
De rotor devanado	150	150	800	150

Nota: Adaptado de NTC 2050. Código eléctrico colombiano (NTC 2050). Bogotá, D.C: ICONTEC; 1998

Excepciones.

1) Cuando los valores de los dispositivos de protección de los circuitos ramales contra cortocircuito y falla a tierra, determinados según la Tabla 26, no correspondan con las capacidades o valores estándar de los fusibles, interruptores automáticos no ajustables, dispositivos térmicos de protección o posiciones de disparo ajustables de los interruptores automáticos, se permite utilizar el valor estándar, capacidad, tamaño o ajuste inmediato superior.

2) Cuando en la tabla del relé de sobrecarga que proporcione el fabricante para usar con el controlador del motor, o de cualquier otra forma en el equipo aparezca rotulada la capacidad máxima nominal del dispositivo de protección del circuito ramal contra cortocircuito y falla a tierra, ese valor no debe superarse ni siquiera si, de acuerdo con los apartados anteriores, se pudiera alcanzar un valor superior.

3) Sólo se debe utilizar un interruptor automático de disparo instantáneo si es ajustable y forma parte de una combinación listada de motor y controlador con protección coordinada del motor contra sobrecarga, cortocircuito y falla a tierra en cada conductor y si el valor de disparo se ajusta para que no supere el especificado en la Tabla 26.

4) Se permite un protector del motor contra cortocircuitos en lugar de los dispositivos de la Tabla 26, si ese protector forma parte de una combinación listada de motor y controlador con protección coordinada del motor contra sobrecarga, cortocircuito y falla a tierra en cada conductor que abra el circuito cuando la corriente supere el 1300 % de la corriente nominal a plena carga.

3.2 Criterios de selección de un controlador

La corriente máxima de disparo de los relés de sobrecarga o de otros dispositivos de protección de los motores, no debe superar al 115% de la capacidad nominal continua de corriente del controlador. Cuando el medio de desconexión del circuito ramal del motor sea independiente del controlador, la capacidad nominal de corriente del medio de desconexión no debe ser menor al ajuste de disparo máximo de los relés de sobrecorrientes que hay en el circuito.

La potencia nominal a la tensión de aplicación no debe ser menor a la potencia nominal del motor.

3.3 Puesta a tierra

Los objetivos de la puesta a tierra son una conexión segura, confiable y libre de interferencias. La puesta a tierra tradicional se basa en la seguridad eléctrica. Ayuda a garantizar la seguridad personal y limita los daños a equipos por fallas eléctricas.

Se debe instalar sistemas de puesta a tierra en las partes metálicas expuestas no portadoras de corrientes que se puedan llegar a energizar, de los bastidores de motores y controladores, para evitar tensiones superiores a la de tierra, en el caso de contacto accidental entre las partes energizadas y los bastidores o envolventes.

Motores: Los bastidores (carcasa) de los motores se deben poner a tierra en cualquiera de las siguientes circunstancias.

- Cuando estén alimentados por alambrados con encerramiento metálico.
- Cuando estén en lugares húmedos.
- Cuando estén en un lugar peligroso (clasificado).
- Si el motor funciona con una terminal a más de 150 V a tierra.

Sin embargo, la conexión equipotencial se debería implementar de manera que no solamente satisfaga los requisitos de seguridad, sino que también mejore el desempeño de CEM de la instalación. Para bandas de conexión equipotencial los conductores adecuados incluyen bandas de metal, bandas de mallas metálicas o cables redondos para estos sistemas de altas frecuencias,

son mejores las bandas metálicas o bandas trenzadas. Una relación dimensional típica longitud/ancho para estas bandas deberían ser inferior a cinco.

Con motores de 100 kW en adelante las conexiones de puesta a tierra externas de las maquinas accionadas pueden requerir conexiones equipotenciales entre la carcasa del motor y la maquinaria accionada. Las aplicaciones típicas son bombas (puesta a tierra por agua) y cajas de engranajes con lubricación central (puesta a tierra por tubos de aceites). El propósito de estas conexiones es equilibrar los potenciales y mejorar la puesta a tierra. Debería tener inductancia baja, de manera que se debería usar una banda metálica o una banda trenzada, y debería seguir la ruta más corta posible. En algunos casos se puede requerir la conexión equipotencial adicional de los componentes del motor, por ejemplo, entre la carcasa del motor y la caja de terminales (GTC 124, 2009). En la Figura 38 se puede ver un ejemplo de bandas trenzadas y bandas metálicas para la conexión equipotencial entre elementos metálicos.



Figura 38. a) Bandas trenzadas. b) Bandas metálicas.

Cuando el alambrado de un motor fijo consiste en cables en tubos o canalizaciones metálicas se debe instalar cajas de unión en donde se encuentre los terminales de los motores y conectar la pantalla de los cables o canalizaciones metálicas a dichas cajas.

Controladores: Los encerramientos de los controladores se deben poner a tierra independientemente de la tensión. Los encerramientos de los controladores deben tener medios para conectar un controlador de puesta a tierra de equipos.

3.3.1.1 Dimensionamiento de cableado de puesta a tierra.

El calibre de los conductores de puesta a tierra de los equipos, de cobre, aluminio o aluminio recubierto de cobre no debe ser menor a lo especificado en la Tabla 27. Cada conductor de puesta a tierra debe tener un calibre determinado sobre la base de la corriente nominal del dispositivo de protección contra sobrecorrientes que proteja los conductores del circuito, según la Tabla 27

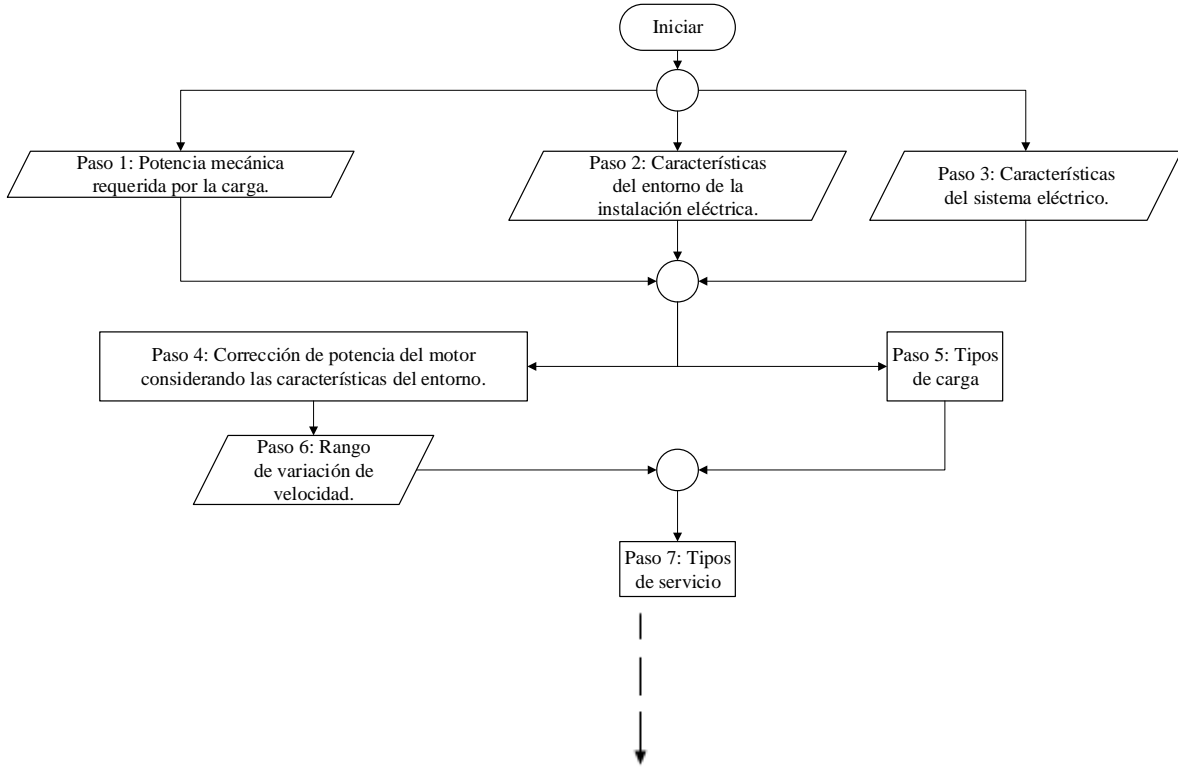
Tabla 27.
Calibre mínimo de los conductores de puesta a tierra.

Corriente nominal o ajuste máximo del dispositivo automático de protección contra sobrecorrientes	Sección transversal			
	Alambre de cobre.		Alambre de aluminio o aluminio revestido de cobre.	
	mm ²	AWG o kcmil	mm ²	AWG o kcmil
15	2,08	14	3,30	12
20	3,30	12	5,25	10
30	5,25	10	8,36	8
40	5,25	10	8,36	8
60	5,25	10	8,36	8
100	8,36	8	13,29	6
200	13,29	6	21,14	4
300	21,14	4	33,62	2
400	26,66	3	42,20	1
500	33,62	2	53,50	1/0
600	42,20	1	67,44	2/0
800	53,50	1/0	85,02	3/0
1000	67,44	2/0	107,25	4/0
1200	85,02	3/0	126,67	250 kcmil
1600	107,25	4/0	177,34	350 kcmil
2000	126,67	250 kcmil	202,68	400 kcmil
2500	177,34	350 kcmil	304,02	600 kcmil
3000	202,68	400 kcmil	304,02	600 kcmil
4000	253,25	500 kcmil	405,36	800 kcmil
5000	354,69	700 kcmil	608,04	1200 kcmil
6000	505,36	800 kcmil	608,04	1200 kcmil

Nota: Adaptado de NTC 2050. Código eléctrico colombiano (NTC 2050). Bogotá, D.C: ICONTEC; 1998

4 Protocolo de dimensionamiento de los componentes para la instalación eléctrica de motores.

Una vez definidas las técnicas de arranque y operación de motores eléctricos trifásicos de inducción normalmente usadas, se concluye que, el sistema accionado a través de variadores de frecuencia es el único sistema que presenta problemas de compatibilidad electromagnética considerables y que requiere de un dimensionamiento especial para no incurrir en subdimensionamiento. Considerando el espectro de armónicos en la entrada y salida del variador de frecuencia además de los criterios de selección definidos en los capítulos anteriores, se define el protocolo para el dimensionamiento de los componentes de la instalación eléctrica de motores de inducción teniendo en cuenta la carga y los problemas de compatibilidad electromagnética, de acuerdo con los siguientes pasos en donde se mostrará un ejemplo de cálculo para el dimensionamiento del sistema eléctrico utilizado para el accionamiento de una bomba centrífuga con una brida dimensionada en mm de 150 kW a una velocidad de 3000 rpm, no se precisa par de arranque. Se considera un entorno de operación con una temperatura ambiente de 35 °C a 2000 msnm. En la Figura 39 se observa el diagrama de flujo del protocolo y posteriormente se realiza la descripción de cada paso.



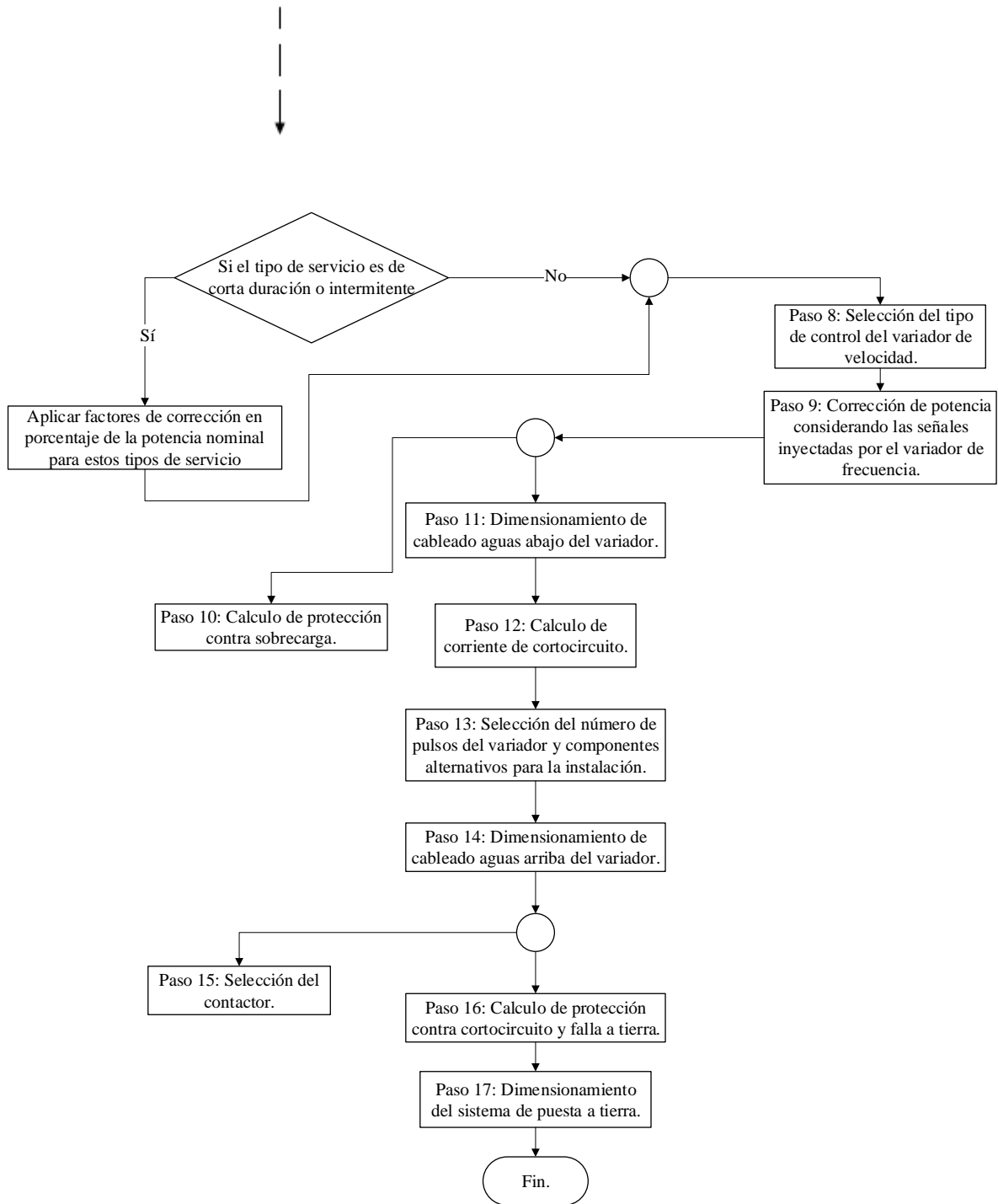


Figura 39. Diagrama de flujo del protocolo para el dimensionamiento de componentes de una instalación eléctrica de un motor de inducción accionado con controlador electrónico.

Paso 1 : Potencia mecánica requerida por la carga.

Se define la potencia mecánica que el motor eléctrico debe suministrar a la carga y se realiza una preselección de la capacidad de potencia del motor, teniendo en cuenta la potencia que será suministrada a dicha carga.

Respuesta al ejemplo: La potencia mínima que el motor debe suministrar es la potencia de la carga, por lo tanto, se selecciona la potencia normalizada de un motor igual o superior a la potencia requerida. Para este ejemplo en particular se selecciona un motor con una potencia de 160 kW (potencia normalizadas según estándar IEC).

Paso 2 : Características del entorno de la instalación eléctrica.

Es importante definir las características del entorno donde se desarrollará la instalación del PDS.

Los parámetros por considerar son los siguientes.

- Parámetros del entorno:
 - Temperatura ambiente.
 - Altura sobre el nivel del mar.

Respuesta al ejemplo: La temperatura ambiente es de 35 °C y la altura sobre el nivel del mar del sitio donde se ubicará el PDS es de 2000 m

Paso 3 : Características del sistema eléctrico de donde será derivada la instalación eléctrica en cuestión.

Los parámetros eléctricos por considerar son los siguientes:

- Frecuencia eléctrica: En el sistema eléctrico colombiano la frecuencia de red es 60 Hz
- Valores de tensión: Los valores de tensión para sistemas trifásicos de baja tensión se caracterizan en Tabla 28

Tabla 28.
Valores de tensión para sistemas trifásicos de baja tensión

Configuración	3φY	3φΔ	3φΔ-	3φY	3φY	3φΔ
Tensión nominal	208/120	240	240/208/120	380/220	480/277	480-440
Número de fases	3	3	3	3	3	3
Número de hilos	4	3	4	4	4	3

Nota: Los datos de esta tabla fueron extraídos de RETIE. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. Bogotá, D.C: Minminas Colombia; 2013

Estos parámetros definen las características eléctricas del sistema desde el alimentador de la instalación hasta el controlador (variador de frecuencia), no obstante, es el controlador quien rige las características eléctricas del subsistema comprendido entre el controlador y el motor en sí.

Respuesta al ejemplo: Para el ejemplo propuesto se asume una configuración 3φY de 480/277 V y 60 ciclos por segundo de frecuencia.

Con los parámetros de la red descritos, se dimensionan las siguientes características del variador de frecuencia (valores comunes en placa característica de variadores):

Tensión de entrada: 480 [V] con tolerancia de -15% a +10%

Tolerancia de la frecuencia de entrada: 47...63 Hz

Fase de entrada: 3

Factor de potencia de deslizamiento: 0,98

Paso 4 : Corrección de potencia del motor considerando las características del entorno

La temperatura ambiente y la altura sobre el nivel del mar afectan las condiciones de refrigeración del motor. En la Tabla 19 se observan los factores de corrección según características del entorno.

Respuesta al ejemplo: Conociendo las características del entorno descritas en el paso 2 se aplican los valores de corrección a la potencia base (160 kW), para este ejemplo el factor de corrección (FC1) según datos de la Tabla 19 es de 0,97 por lo tanto la capacidad del motor bajo estas condiciones es ahora 155 kW, aun superior a la potencia requerida por la carga (150 kW).

Paso 5 : Tipos de carga.

El dimensionamiento de los componentes depende en gran medida del comportamiento de la carga, la cual, se puede clasificar según el comportamiento del par en función de la velocidad, tal como sigue:

- Carga con par constante: En las máquinas de este tipo, el par permanece constante durante la variación de la velocidad y la potencia aumenta proporcionalmente al cambio de la velocidad.

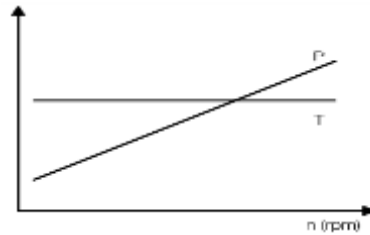
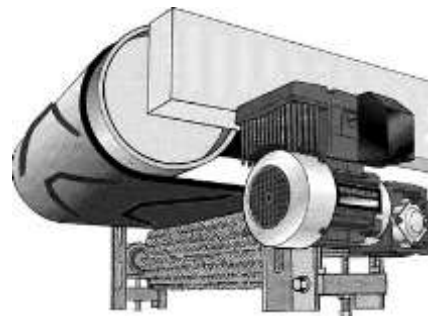


Figura 40. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par constante. Recuperado de ABB. Dimensionado de un sistema de accionamiento. ABB-Guía técnica nº 7; 2000
T: Par resistente; P: Potencia; n: Velocidad

Un tipo de carga de par constante es típico cuando se manejan volúmenes fijos. Por ejemplo, elevadores, cintas transportadoras, extrusoras entre otras.



a) Sistemas de elevación



b) Banda transportadora

Figura 41. Ejemplo de cargas con par constante.

- Carga con par lineal: En este caso el par aumenta proporcionalmente con el cambio de la velocidad y la potencia cambia con el cuadrado del cambio de la velocidad.

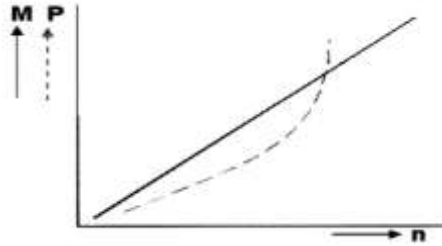


Figura 42. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par lineal. Recuperado de ABB. Dimensionado de un sistema de accionamiento. ABB-Guía técnica nº 7; 2000
M: Par resistente; P: Potencia; n: Velocidad.

Como ejemplo tenemos las mezcladoras, las bombas volumétricas de tornillo y los compresores



a) Mezcladora



b) Bomba volumétrica de tornillo



c) Compresor de tornillo

Figura 43. Ejemplo de cargas con par lineal.

- Carga con par cuadrático: El torque en este tipo de máquinas cambia proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad y la potencia cambia proporcionalmente con el cubo de la velocidad.

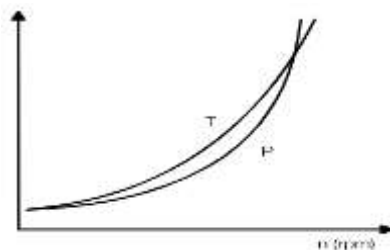


Figura 44. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par cuadrático.
 Recuperado de ABB. Dimensionado de un sistema de accionamiento. ABB-Guía técnica nº 7; 2000
 T: Par resistente; P: Potencia; n: Velocidad

Las aplicaciones típicas son bombas centrifugas y ventiladores.



a) Bomba centrifuga



b) Ventilador

Figura 45. Ejemplo de cargas con par cuadrático.

- Carga con par hiperbólico o potencia constante: Este tipo de aplicaciones requiere una potencia nominal para cualquier tipo de velocidad y el par se reduce con el aumento de la velocidad.

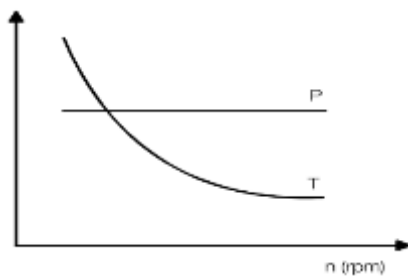


Figura 46. Curva característica del par y la potencia en función de la velocidad para una carga con par hiperbólico.
 Recuperado de ABB. Dimensionado de un sistema de accionamiento. ABB-Guía técnica nº 7; 2000
 T: Par resistente; P: Potencia; n: Velocidad

Una carga a potencia constante es normal cuando el material se enrolla y el diámetro cambia durante este proceso. Un ejemplo de esto es una maquina bobinadoras o desbobinadora.



Figura 47. Ejemplo de maquina con par hiperbólico.

Cuando el par es de tipo hiperbólico el conjunto motor y variador deben tener la capacidad de entregar el par requerido por la carga, a través del sistema de control.

No obstante, también hay otros muchos tipos de cargas difíciles de describir en un contexto general.

Según el tipo de carga se define la categoría o diseño del motor de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 29.
Categoría o tipo de diseño del motor según tipo de carga.

Tipo de carga	Categoría (IEC)	Diseño (NEMA)
Torque constante	H	C
Torque lineal	N	A-B
Torque cuadrático	N	A-B
Torque hiperbólico	D	D

Respuesta al ejemplo: La carga dada se clasifica como una carga de par cuadrático, por lo tanto, se selecciona un motor con una categoría de diseño N.

Paso 6 : Rango de variación de velocidad.

Conocer la velocidad de operación del sistema permite seleccionar el número de polos del motor y el rango de velocidad considerando cuatro casos posibles:

- Velocidad superior al 100% de la velocidad nominal: Operación en zona de debilitamiento del campo.
- Velocidad de operación superior al 50% de la velocidad nominal: La reducción de la capacidad de refrigeración del motor es pequeña.
- Velocidad de operación inferior al 50% de la velocidad nominal: Se reduce la capacidad de refrigeración del motor por reducir el caudal de aire: Si la carga asociada es estrictamente de orden constante muy posible se hará necesario dar al motor un medio de refrigeración independiente de su eje.
- Velocidad de operación inferior al 10% de la velocidad nominal: El torque producido por el conjunto variador-motor se ve reducido en variadores convencionales que ofrecen control escalar, variadores con tecnologías avanzadas ofrecen control vectorial, mediante el cual se conoce la necesidad de torque dependiendo del requerimiento de la carga.

Respuesta al ejemplo: El par necesario a 3000 rpm es:

$$T_{load} = \frac{P}{w} = \frac{150 * 1000}{2\pi/60 * 3000} = 478 [Nm]$$

Los motores de 2 y 4 polos considerando una frecuencia nominal de 60 Hz se configuran como alternativas para la operación de la bomba.

- Para un motor de 2 polos la capacidad de carga a 3000 rpm (velocidad superior al 50% de la nominal) según Figura 35 es aproximadamente el 97%, factor de corrección que se debe aplicar con el factor de corrección por entorno:

$$T_M \geq \frac{478}{0,97 * FC1} = 508 [Nm]$$

La correspondiente potencia nominal deberá ser como mínimo de:

$$P_n \geq T * w = 508 * 3600 * \frac{2\pi}{60} = 192 [kW]$$

La potencia normalizada según la IEC de mayor proximidad a la potencia mínima del motor es de 200 kW, con una capacidad real (C_{load}) considerando el punto de operación y el entorno de:

$$c_{load} = 200 * 0,97 * 0,97 * \frac{3000}{3600} = 157 [kW]$$

Superior a la potencia requerida. Se selecciona entonces un motor de 200 kW, 460V, 60Hz, 3592 rpm, fp = 0,87 y eff = 92%

$$T_n = \frac{200 * 1000}{3592 * \frac{2\pi}{60}} = 532 [Nm]$$

Como $T_{Load} = 478 \geq 0,8 \cdot T_n = 425$ la intensidad aproximada del motor a una velocidad de 3000 rpm (zona de flujo constante) es:

$$i_m = T_{Load}[pu] = \frac{478}{532} = 0,9 [pu]; I_m = 0,9 * 314 = 283 [A]$$

- Para un motor de 4 polos la capacidad de carga a 3000 rpm (velocidad superior al 100% de la nominal) según Figura 35 es aproximadamente el 62%, por lo tanto, el par nominal del motor debe ser como mínimo de:

$$T_M \geq \frac{478}{0,62 * 0,97} = 795 [Nm]$$

La correspondiente potencia nominal deberá ser como mínimo de:

$$P_n \geq T * w = 795 * 1800 * \frac{2\pi}{60} = 150 [kW]$$

Se selecciona un motor de 160 kW, 460V, 60Hz, 1795 rpm, fp = 0,87 y eff = 92%

Se sabe que en esta zona la potencia es constante, por lo tanto, la capacidad del motor considerando los factores del entorno, es de 155 kW, superior a la potencia requerida.

$$T_n = \frac{160 * 1000}{1795 * \frac{2\pi}{60}} = 851 [Nm]$$

Para calcular la corriente por el método aproximado en la zona de debilitamiento del campo se cumplen los criterios establecidos ($T_{Load} = 478 \geq 0,8 \cdot T_n(n_n/n) = 407$; $P_{Load} = 150 \geq 0,8 \cdot P_n = 128$) por lo tanto la corriente aproximada en el punto de operación es:

$$i_m = P_{Load}[pu] = \frac{150}{160} = 0,94 [pu]; I_m = 0,94 * 251 = 235 [A]$$

Un motor de 4 polos precisa menos intensidad en el punto de funcionamiento de la bomba. Así, probablemente constituye una elección más económica que un motor de 2 polos. Sin embargo la velocidad máxima utilizable está limitada no solamente por la reducción del torque debido al debilitamiento del campo a velocidades superiores de la velocidad de vacío, sino también por la resistencia mecánica y la estabilidad del rotor, por la capacidad de velocidad del sistema de rodamientos y por otros parámetros mecánicos.

La NTC 2805 (IEC 60034-1) especifica el límite de exceso de velocidad de las máquinas de corriente alterna convencionales en 1,2 veces la velocidad nominal máxima. Estas condiciones limitan la selección de un motor de cuatro polos para esta aplicación (1,7 veces la velocidad de diseño), por lo tanto, debe seleccionarse un diseño especial el cual sea capaz de operar sin problemas a la velocidad que se requiere (3000 rpm – 100 Hz). Muchos fabricantes de motores eléctricos ofrecen líneas de motores diseñados para trabajar con reguladores electrónicos de velocidad lo cual indica un amplio espectro de frecuencias.

Según lo indicado la mejor opción para esta aplicación es:

Un motor de 160 kW, 4 polos, 460 V, 60Hz, 1795 rpm, $f_p = 0,87$, $eff = 92\%$ y con un diseño capaz de soportar frecuencias de operación hasta de 100 Hz.

Paso 7 : Tipos de servicio.

Los ítems mencionados en el Paso 5 y el Paso 6 están relacionados con el ciclo de trabajo de la carga detallados en anexo A, donde se define, cuanto porcentaje del tiempo total de operación estará el motor a una determinada velocidad. Una vez se define el ciclo de trabajo se selecciona el tipo de servicio del motor de acuerdo con la Tabla 2. Las potencias indicadas en los catálogos se basan en el servicio en funcionamiento continuo, S1, a potencia de régimen. En caso de no existir ninguna indicación del tipo de servicio, se considera que se trata de un servicio en funcionamiento continuo.

Debido al menor aumento de la temperatura del motor en períodos de corta duración o en servicio intermitente, generalmente es posible pedirle una potencia mayor al motor respecto a la potencia en funcionamiento continuo. En la Tabla 30 se observa los porcentajes de incrementos

de potencia respecto de la nominal que puede soportar una maquina sin comprometer el aislamiento para servicios de corta duración, S2 y servicio intermitente S3.

Tabla 30.

Potencia permitida en porcentaje de la potencia nominal para servicio de corta duración y servicios intermitente.

Servicio de corta duración, S2	Polos	Potencia permitida en % de la potencia nominal en S1, servicio continuo para motores tamaño (Frame IEC):		
		63-100	112-250	280-400
30 minutos	2	105	125	130
	4-8	110	130	130
60 minutos	2-8	100	110	115
Servicio intermitente, S3	Polos	Potencia permitida en % de la potencia nominal en S1, servicio continuo para motores tamaño:		
		63-100	112-250	280-400
15%	2	115	145	140
	4	140	145	140
	6-8	140	140	140
25%	2	110	130	130
	4	130	130	130
	6-8	135	125	130
40%	2	110	110	120
	4	120	110	120
	6-8	125	108	120
60%	2	105	107	110
	4	110	107	110
	6-8	115	105	110

Nota: Adaptado de ABB. Guía del motor – información técnica básica de motores estándar de baja tensión. La guía del motor. ABB; 2014

Para los demás tipos de servicio la cargabilidad del motor es igual a la potencia nominal descrita en placa característica para las condiciones de régimen.

Respuesta al ejemplo: Como el ciclo de trabajo no es indicado se asume que la maquina trabaja en funcionamiento continuo por lo que el tipo de servicio indicado en el motor debe ser S1, según Tabla 2.

Paso 8 : Selección del tipo de control del variador de velocidad.

En la sección 2.4 se presentaron diferentes técnicas de control para el accionamiento de motores eléctricos, de allí se dedujo que una técnica de control adecuado para este fin es la modulación por ancho de pulsos, la cual reduce el porcentaje de armónicos de las señales inyectadas cuando se utilizan sistemas multinivel, pero esto requiere de topologías de potencia complejas y de

mayor costo, por consiguiente, es recomendable seleccionar un sistema de control básico SPWM, a menos que la velocidad de operación sea inferior al 10% de la velocidad nominal del motor, en este caso se debe seleccionar un sistema de control vectorial de lazo cerrado, el cual permite un seguimiento del par requerido por la carga.

Respuesta al ejemplo: Como la velocidad de operación es superior al 10% de la nominal, se selecciona un sistema de control SPWM.

Paso 9 : Corrección de potencia considerando las señales inyectadas por el variador de frecuencia.

Para aplicar el factor de corrección en presencia de armónicos descrito en la sección 3.1.1.2 se selecciona inicialmente la frecuencia mínima de operación de la señal portadora del posible variador de frecuencia.

La frecuencia mínima de operación de la señal portadora es la frecuencia con la cual la capacidad de carga del motor se iguala a la potencia requerida por la carga. Se define entonces el factor de corrección (FC2) para esta igualdad.

$$FC2 = \frac{P_{load}}{C_{load}}$$

Con la relación descrita en la Figura 33 se determina el factor armónico de tensión y se establece la frecuencia mínima de la señal portadora de acuerdo con la relación de la Figura 34. Una vez ejecutada esta acción se seleccionan los parámetros de control del variador de frecuencia.

Si el FC2 es aproximadamente 1 ($FC2 > 0,99$) se selecciona un motor con mayor capacidad de potencia, se repite el Paso 6 para el motor ahora seleccionado comparándolo con otras opciones

presentes en ese paso y a la selección resultante de este proceso se le aplica el procedimiento descrito en este paso.

Respuesta al ejemplo: La capacidad de carga del motor seleccionado es de 155 kW y la potencia requerida por la carga es de 150 kW, por ello el factor de corrección es de 0.97. Utilizando la relación de la Figura 33, se deduce que el factor de distorsión armónica es aproximadamente 0,04, tal valor corresponde a una frecuencia mínima de la señal portadora de 10 kHz de acuerdo con la relación de la Figura 34.

El valor de operación de la frecuencia de la señal portadora debe ser próximo o superior a 10 kHz considerando valores de operación que den como resultado un índice de modulación de frecuencia impar y divisible por tres.

Conforme con esto, el rango de la frecuencia de la señal portadora del variador debe ir mínimo hasta 10 kHz, el rango del voltaje de salida debe ir desde 0V a 460V (valor de la tensión nominal del motor) y el rango de la frecuencia de salida (frecuencia de la señal moduladora) debe ir como mínimo hasta 100Hz.

Paso 10 : Calculo de protección contra sobrecarga.

Normalmente se define la corriente de sobrecarga teniendo en cuenta el valor nominal del motor, sin embargo, bajo las condiciones de operación expuesta en los pasos anteriores, tal corriente debe ser de-rateada a la capacidad de carga del motor considerando los efectos ambientales y la inyección de señales distorsionadas. Una vez determinada la capacidad del motor se define el ajuste de corriente de sobrecarga de acuerdo con el sistema de protección usado, tal como sigue:

- El ajuste de la corriente de protección contra sobrecarga para los relés térmicos o dispositivo de control con opción de disparo contra sobrecarga en sus tres fases se ejecuta de acuerdo con los valores de la Tabla 23.
- Cuando se utiliza un protector térmico integrado con el motor se debe ajustar los valores de protección contra sobrecarga según los valores de la Tabla 25.
- Cuando se utilicen sensores de temperaturas en el bobinado del motor, se debe ajustar el umbral de disparo de acuerdo con el valor nominal de temperatura rotulado en la placa característica del motor.

Respuesta al ejemplo: Para un factor de servicio igual a 1, el valor de ajuste máximo de la corriente de protección contra sobrecarga debe ser igual a la ampacidad del motor por 1,15 conforme a lo estipulado en la Tabla 23. Por consiguiente, la intensidad de regulación máxima (I_{rmax}) es:

$$I_{rmax} = \frac{150 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 460 * 0,87 * 0,92} * 1,15 = 235 * 1,15 = 270 \text{ [A]}$$

Para este ejemplo se asume que el variador de frecuencia no tiene la opción de disparo contra sobrecarga en las tres fases por lo tanto se debe seleccionar un relé térmico con las siguientes características:

- Clase: 10
- Tensión nominal (U_e): 460V
- Tensión asignada de aislamiento (U_I): 600V
- Corriente nominal (I_n - máxima corriente de regulación posible): $\geq 270A$.

La clase 10 se selecciona teniendo en cuenta que el motor es accionado por un variador de velocidad y la corriente en el arranque es aproximadamente la corriente de operación.

Paso 11 : Dimensionamiento de cableado aguas abajo del variador.

La capacidad de corriente mínima de los conductores aguas abajo de la instalación se determina considerando la potencia y tensión nominal del motor de acuerdo con la Tabla 17.

Cuando se utiliza un variador de velocidad con sistema de control por modulación de ancho de pulsos el motor filtra gran parte de la distorsión de corriente aumentando su eficiencia a mayor velocidad, por lo tanto, se discriminan la reducción de capacidad de corriente por presencia de armónicos, de modo que el valor de capacidad preseleccionado se debe de-ratear considerando solo los parámetros del entorno de la instalación incluyendo la corrección por agrupamiento. Sin embargo, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- En lo posible utilizar topologías descentralizadas (longitud del cable entre el convertidor y el motor menor a 20m).
- Cables con pérdidas dieléctricas mayores.
- Realizar una conexión simétrica de los conductores (Figura 36) o usar cables simétricos especiales para variadores de frecuencia (Figura 37).

Respuesta al ejemplo: Con una potencia base de 150 kW y 460V interpolamos los valores de la Tabla 17 para encontrar la capacidad de corriente requerida por el cableado de la instalación, la cual resulta en 240A. Este valor debe ser corregido según parámetros del entorno, acorde al factor de corrección correspondiente a los valores dados en la Tabla 20, el factor de corrección para un cable con una temperatura máxima de operación de 90°C a la temperatura

ambiente de nuestra instalación es de 0,96, por lo tanto, la capacidad de corriente mínima del cableado con este factor de corrección debe ser de $240 * 1,25 / 0,96 = 313$ [A]

Se seleccionan dos cables VFD por fase, cada cable con un calibre de 3X1/0 AWG (fases) + 3X10 AWG (tierra), o tres cables comunes por fase cada uno con un calibre de 2 AWG.

Paso 12 : Calculo de corriente de cortocircuito.

Para calcular la corriente de cortocircuito se utiliza el método planteado en la sección 3 para lo cual es necesario conocer el nivel de tensión del PCC, la distancia total de la instalación y el calibre del alimentador, con esta información se calcula la corriente de cortocircuito mínima según Ecuación 9.

Respuesta al ejemplo: Se asume que el calibre del conductor es igual aguas abajo del variador que aguas arriba.

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito se definen los siguientes parámetros.

- Tensión: 460 V
- Resistividad del material: Cobre – 0,017 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
- Sección transversal del conductor: 53,51 [mm^2]
- Longitud de la instalación: 40 [m] (Estimados para el ejemplo)
- FC1 (Según Tabla 16): 1
- FC2 (Según Ecuación 10): 2

$$I_{sc} = \frac{0,8 * U * FC1 * FC2}{1,5 * \rho * \frac{2L}{S}} = \frac{0,8 * 460 * 1 * 2}{1,5 * 0,017 * \frac{2 * 40}{53,51}} = 19 \text{ [kA]}$$

Paso 13 : Selección del número de pulsos del variador y componentes alternativos para la instalación.

Siempre es mejor desde el punto de vista técnico un mayor número de pulsos, pero esto requiere de una inversión mayor, por esto es necesario dimensionar el sistema con un número de pulsos tal que en el PCC no se supere los límites operacionales según el estándar IEEE 519-2014 descritos en la sección 3.

Normalmente no se superan los límites operacionales de tensión de la Tabla 14. por consiguiente, solo serán contemplados los límites referentes a la distorsión de corriente descritos en la Tabla 15.

Se calcula entonces la relación que existe entre la corriente de carga (I_L , capacidad de corriente del motor de-rateado) y la corriente de cortocircuito (I_{cc}). De acuerdo con esta relación se obtienen los límites de distorsión armónica en el PCC y se comparan estos límites con el espectro de frecuencia obtenidos a través de las simulaciones realizadas en la sección 2.4.2.1. Tales espectros se encuentran en la Tabla 10 y en la Tabla 11 para variadores de 6 pulsos con reactancia en serie y 12 pulsos respectivamente.

En cualquiera de los casos que no se cumplan los límites operacionales se deben considerar las siguientes alternativas.

- Seleccionar un variador con mayor número de pulsos (Variadores con un número de pulsos mayor a 6 requiere de transformadores hexafasicos)
- Incluir en el sistema filtros de armónicos.
- Combinar diferentes alternativas.

En el mercado conseguimos filtros para convertidores de potencia con las siguientes características.

Filtros LR - Reactancias: Las reactancias de filtrado LR permiten reducir los armónicos de corriente de cualquier convertidor desde niveles de 40% a 50% a valores en torno al 20%. Reducen la corriente de cortocircuito y aumentan la seguridad de los semiconductores del convertidor. En la Figura 48 se ilustra un filtro de este tipo.

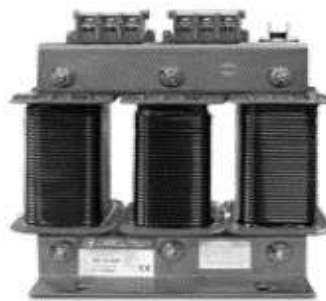


Figura 48. Filtro de armónico LR

Filtros LCL: Los filtros LCL han sido especialmente diseñados para reducir los armónicos de corriente absorbidos por convertidores de potencia con rectificador de entrada (Convertidores de frecuencia para motores, UPS, etc.) Esencialmente están formados por una combinación serie-paralelo de reactancias y condensadores, adaptados para reducir el THD_I de dichos rectificadores. Se trata de un paso más con respecto a la simple reactancia de filtrado y permiten reducir el THD_I a valores próximos al 8%, tal como se exige en el estándar IEEE-519. La estructura básica de los filtros LCL se muestran en la Figura 49, constituido por L1, L2, L3-C por fase, si el variador está equipado con una reactancia (L4), posiblemente no sea necesario la reactancia L2.

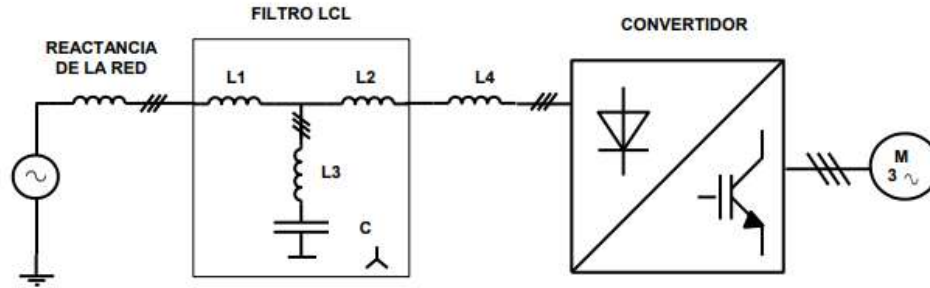


Figura 49. Estructura básica de filtros LCL. Recuperado de Circuito, filtros LCL, manual de instrucciones.

Los filtros se seleccionan de acuerdo con la corriente adsorbida por el variador de frecuencias.

Respuesta al ejemplo: Se selecciona la opción más económica, seis pulsos.

Calculamos la relación que existe entre la corriente de carga (I_L , capacidad de corriente del motor de-rateado) y la corriente de cortocircuito (I_{cc}).

$$I_L = \frac{P_{load}}{\sqrt{3} * V * fp * \eta} = \frac{150 \text{ kW}}{\sqrt{3} * 460 * 0,87 * 0,92} = 235,2$$

$$\frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{19 \text{ kA}}{235 \text{ A}} = 81$$

Acorde con esta relación los limites operacionales en el PCC, son

Máxima distorsión armónica de corriente en porcentaje de I_L						
Orden de los armónicos individuales						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 11$	THD _i
$50 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12

Comparando los limites aquí descritos con el espectro de armónicos de corriente para el variador de 6 pulsos descrito en la Tabla 10, podemos concluir que un variador de 6 pulsos

($\text{THD}_I = 28\%$) no cumple con los límites del estándar IEEE 519 bajo estas condiciones, por lo tanto, es necesario seleccionar una de las alternativas propuestas. La selección adecuada está ligada al presupuesto y a las características técnicas de la instalación, por lo tanto, arbitrariamente seleccionaremos un filtro LCL, que cumpla con los siguientes parámetros:

Tensiones estándar: 460V

Frecuencia: 60Hz

Corriente nominal de carga: ≥ 250 A

Corriente nominal de filtrado: $\geq 40\%$ de la corriente nominal de carga

THD de corriente residual: 8% Aprox.

Caída de tensión a I nominal: $< 2\%$

Temperatura ambiente: 40°C

Paso 14 : Dimensionamiento de cableado aguas arriba del variador.

El procedimiento para el cálculo de la capacidad de corriente del cableado aguas arriba del variador es similar al procedimiento del Paso 11, con la diferencia que se debe considerar la corrección por efecto piel de acuerdo con la sección 3.1.2.2.

Respuesta al ejemplo: De la relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida obtenemos una corriente estimada en la entrada del variador. Como el motor trabaja en la región de debilitamiento del campo el valor rms de la tensión en la entrada es aproximadamente el valor rms de la tensión de salida.

La capacidad de corriente mínima del cableado considerando el entorno de operación, debe ser $1,25 \times 240 / 0,96 = 313$, lo cual resulta en 2 cables por fase de calibre 1/0 AWG con un valor de resistencia eléctrica DC a 90°C igual a 0,419 Ω /km o 0,674 Ω /mi.

Si en los componentes de la instalación se incluye el filtro recomendado en el Paso 13 no es necesario de-ratear el cable por efecto piel, pero, como ejemplo asumiremos que tenemos una instalación eléctrica más robusta y que los armónicos en el PCC aguas abajo del transformador del sistema cumplen con los límites operacionales descritos en el estándar IEEE 519, por lo tanto, no se hace necesario la inclusión del filtro, por consiguiente se realizara un de-rateo del cableado por efecto piel tal como sigue:

Con el valor de resistencia DC para el cable dado se define los valores de resistencias en AC para las frecuencias de armónicos típica de un variador de 6 pulsos con reactancias en serie descrito en la Tabla 10, la cual citaremos a continuación:

Armónico	5	7	11	13	17	19	23	25	THI
%fundamental	20	14	9	7,5	6	5	4,3	4	28%

Aplicamos entonces el procedimiento de la sección 3.1.2.2 con el objeto de encontrar el factor de corrección de capacidad de corriente del cableado por efecto piel.

Se determina entonces el valor de X para la frecuencia fundamental.

$$X_{60} = 0,0636 * \sqrt{\frac{f * \mu}{Rdc}} = 0,0636 * \sqrt{\frac{60 * 1}{0,674}} = 0.6$$

De la Tabla 22 se determina el valor de k, el cual se multiplica por la resistencia en DC para obtener la resistencia del cable a la frecuencia de operación, el valor de k según la tabla es

aproximadamente 1,00067 por lo tanto la resistencia en AC para 60 Hz (R_{60}) es 0,675 Ω /mi ($K \cdot R_{DC}$).

Con un procedimiento similar se determina el valor de X, k, la resistencia del cable y la relación de efecto piel para cada una de las frecuencias de los armónicos de corriente. Los resultados se describen en la siguiente tabla.

Armónicos		X	K (de Tabla 22)	Rf	Relación de efecto piel, E (Rf/R60)
Orden	Frecuencia				
5	300	1,3418	1,015	0,68411	1,015
7	420	1,5876392	1,026	0,691524	1,026
11	660	1,9902111	1,078	0,726572	1,078
13	780	2,1635875	1,111	0,748814	1,111
17	1020	2,474157	1,175	0,79195	1,175
19	1140	2,6156498	1,201	0,809474	1,201
23	1380	2,8778404	1,286	0,866764	1,286
25	1500	3,0003561	1,318	0,888332	1,318

Una vez obtenidas las relaciones de efecto piel se aplica el factor de corrección definido en la Ecuación 16.

$$q = \sum_0^n E_n * i_n^2$$

$$q = \frac{1 * 100^2 + 1,02 * 20^2 + 1,03 * 14^2 + 1,08 * 9^2 + 1,11 * 7,5^2 + 1,18 * 6^2 + 1,20 * 5^2 + 1,29 * 4,3^2 + 1,32 * 4^2}{100^2} = 1,087$$

La capacidad mínima de corriente es:

$$I_{RMS q} = I_{RMS} * q = 144 * 1,087 = 157 [A]$$

Por lo tanto, si no se considera el filtro de armónico en la entrada del variador, el calibre del cable alimentador debe ser como mínimo de 1/0 AWG (dos por fase). Si se incluye en la

instalación el filtro LCL el calibre mínimo debe ser 1 AWG (dos conductores por fase con capacidad de $170 \times 0,96 / 1,087 = 150$ [A] cada uno).

Paso 15 : Selección del contactor.

Cuando se utiliza un variador de velocidad para el accionamiento de un motor la acción de conmutación para el arranque y parada de la maquina se ejecuta a través del variador. Por lo tanto, se puede excluir el contactor del circuito de potencia. Sin embargo, cuando el motor está detenido no existe un aislamiento total del motor respecto a la red y existe entonces riesgo de electrocución para una persona que entre en contacto con los bornes del motor, por esta razón, se hace necesario el uso de un mecanismo de apertura que aislé la instalación de la red, dicho mecanismo se puede ejecutar a través de un seccionador y un contactor.

Cuando se selecciona un contactor para accionamiento de un motor de inducción, se selecciona la categoría AC3 o AC4 dependiendo del comportamiento de la carga, pero en un sistema con variador de frecuencia es el variador el encargado de arrancar/parar el motor bajo condiciones normales de operación y bajo condiciones de falla si está diseñado para tal fin, por otro lado el contactor ubicado aguas arriba del variador donde el factor de potencia es relativamente alto, es utilizado con el objetivo de garantizar un seccionamiento manual para intervención del sistema o seccionamiento automático en caso de emergencia o paradas por fallo, por consiguiente la categoría del contactor debe ser AC1 y no las categorías normalmente utilizadas en sistemas de accionamientos que no incluyen controladores electrónicos.

Es importante conocer la corriente de empleo para definir el tamaño del contactor según valores normalizados descritos en la Tabla 5. Con la categoría de servicio se obtiene la corriente de corte (I_c) aplicando el factor I_c/I_e mostrado en la Tabla 6.

Respuesta al ejemplo: Tal como se indicó, la categoría del contactor debe ser AC1. La corriente de empleo del contactor debe ser mayor o igual a la corriente nominal del variador y la corriente nominal del variador debe ser superior a la corriente nominal del motor (>250 [A]) y al 87% de la corriente máxima de ajuste del dispositivo de protección contra sobrecarga (>235 [A]), considerando lo dicho el tamaño del contactor debe ser 5 según norma NEMA o A300 Según la IEC. Los demás parámetros se definen de acuerdo con los parámetros de la red.

Paso 16 : Calculo de protección contra cortocircuito y falla a tierra.

La protección contra fallas por cortocircuito y fallas a tierra se puede ejecutar a través de los dispositivos descritos en la Tabla 26 en donde se definen los parámetros máximos de ajuste según el dispositivo de protección. Este dispositivo debe cumplir con los parámetros establecidos en la sección 3.1.4 además de los siguientes criterios.

- Si se utiliza como dispositivo de protección un interruptor termomagnético el calibre de este (I_r) debe ser menor a la intensidad admisible por el conductor instalado (I_z) pero superior a la corriente de empleo.
- La corriente de ajuste contra sobrecarga debe ser menor al calibre del interruptor termomagnético.
- El máximo valor para la corriente magnética es $8I_n$ según datos de Tabla 26 para interruptores magnéticos.
- El poder de corte del interruptor termomagnético debe ser superior a la corriente de cortocircuito.

Respuesta al ejemplo: Para la protección contra cortocircuito y falla a tierra seleccionamos un interruptor termomagnético.

Para el dispositivo seleccionado el máximo valor de ajuste o categoría es 2,5 veces la corriente definida en la Tabla 17 según valores de capacidad del motor. Que en este caso es

$$I_{rmax} = 250 * 2,5 = 625 [A]$$

Sin embargo, el calibre del interruptor debe estar comprendido entre:

$$235 [A] \leq I_r \leq 300 [A]$$

Los calibres próximos normalizados son 250 A y 400 A. El calibre 250 de un interruptor fijo garantiza una protección contra sobrecarga para la instalación, pero compromete la coordinación de protecciones, pues accionaria al tiempo o antes que el relé térmico, el cual se puede ajustar como mínimo en 1,05 de la corriente de empleo ($235 * 1,05 \approx 250A$) y el calibre 400 de un interruptor fijo no garantiza la protección contra sobrecarga de la instalación. Por tal razón el dispositivo de protección debe ser regulable. Se selecciona entonces un interruptor regulable de calibre 400, para el cual se debe ajustar la curva térmica en 0,7 ($I_r = 0,7I_n$) ubicando de este modo la protección en 280 A, valor que cumple los criterios de selección. El máximo valor para la corriente magnética corresponde a:

$$I_{m.max} = 250 * 8 = 2000 [A]$$

Lo que corresponde a un ajuste de la corriente magnética en el interruptor seleccionado de 5, no obstante, este valor se estima con el propósito de garantizar que la corriente de arranque en el motor no interrumpa el circuito, con un variador de velocidad la corriente en el arranque es aproximada a la corriente de operación, entonces la corriente de magnetización se puede reducir

a los valores de una curva de disparo tipo B (I_m entre 3 a 5 I_n), por lo tanto se debe ajustar la corriente magnética en el interruptor seleccionado en 2, para una corriente magnética de 800 A. obteniendo como resultado un valor igual a 3,2 de la corriente nominal del motor.

El poder de corte del interruptor debe ser 20 kA (valor normalizado) superior a la corriente de cortocircuito (19 kA).

Paso 17 : Dimensionamiento del sistema de puesta a tierra.

Cuando nos referimos al sistema de puesta a tierra en realidad hablamos del dimensionamiento del cableado de puesta a tierra y de las recomendaciones para tal sistema descritas en la sección 3.3, en donde se destaca una conexión equipotencial entre las partes conductoras del motor, la maquina accionada y el sistema de puesta a tierra. El calibre mínimo del cable de puesta a tierra se define de acuerdo con la Tabla 27.

Respuesta al ejemplo: Según la Tabla 27 el calibre del cable de puesta a tierra debe ser como mínimo 3 AWG.

5 Conclusiones

A través de este trabajo de grado se ha desarrollado un protocolo de dimensionamiento de los componentes para la instalación eléctrica de motores trifásicos de inducción, considerando las cargas y los problemas de compatibilidad electromagnética específicamente en presencia de variadores de frecuencia. Las conclusiones más relevantes de este trabajo se citan a continuación.

- Los componentes eléctricos necesarios para el correcto funcionamiento de una instalación eléctrica de un motor de inducción accionado a través de un variador de velocidad dependen de los límites operacionales del sistema, la cargabilidad de los componentes y de las características del elemento perturbador.
- En un PDS en donde se utilice un arrancador suave como elemento controlador no es necesario redefinir los valores nominales de los componentes por la presencia de perturbaciones electromagnéticas, considerando que en estado estable los niveles de perturbaciones son insignificantes.
- Si el elemento controlador de un PDS es un variador de frecuencia (*Variable Frequency Drive.VFD*), se define este como la fuente de perturbaciones y se caracterizan los componentes de armónicos inyectados por el elemento perturbador a la red y al motor, de acuerdo con el número de pulsos y el tipo de control utilizado.
- Cuando se utiliza un variador de frecuencia en un PDS se dimensionan los componentes de la instalación eléctrica considerando los elementos desde el alimentador hasta el controlador y los elementos desde el controlador hasta el motor de forma independientes, dado que las características eléctricas son diferentes en cada zona.

- Los elementos desde el alimentador hasta el controlador (VFD) se dimensionan teniendo en cuenta las características de la red eléctrica, las características del entorno y la perturbación electromagnética inyectada por el elemento perturbador.
- Los componentes comprendidos entre el controlador y el motor se dimensionan considerando las señales de salida del elemento perturbador, las características del entorno y la susceptibilidad de los componentes a las señales inyectadas por el controlador.
- La configuración entre el número de pulsos presentes en la etapa rectificadora y elementos adicionales (filtros o transformadores desfasadores) define el espectro de armónicos de las señales de corriente que el variador inyecta a la red. Mayor número de pulsos se traduce en un menor espectro de armónicos, sin embargo, esto exige la inclusión de uno o varios transformadores desfasadores.
- El tipo de control y la topología del circuito de potencia de la etapa de inversión definen la forma de onda de las señales de tensión que se inyecta al motor. Éstas señales y la capacidad de autofiltrado de corrientes armónicas que presenta el motor definen el factor de derrateo por perturbaciones electromagnéticas de los elementos que hacen parte de la instalación en esta zona.
- Los factores de corrección por presencia de armónicos de los elementos aguas abajo del controlador están correlacionados con la frecuencia de la señal portadora del VFD.
- Los valores nominales de un motor accionado por un VFD se redefinen considerando la distorsión armónica de tensión, las características del entorno además de la frecuencia de operación si no se cuenta con un sistema de refrigeración independiente.
- La ampacidad del cableado eléctrico se redefine teniendo en cuenta el efecto piel producto de la distorsión armónica de corriente.

- El sistema de protección contra sobrecarga se dimensiona considerando la cargabilidad del motor corregida según los criterios planteados.
- Los elementos de maniobra en la zona comprendida entre el alimentador y el controlador se dimensionan considerando una carga de corriente alterna con un factor de potencia elevado y con corriente de arranque reducida ($I_{arr} < 1,5$ pu).
- Es importante realizar una conexión equipotencial del sistema de puesta a tierra de manera que no solamente satisfaga los requisitos de seguridad, sino que también mejore el desempeño de CEM de la instalación.

6 Referencias

- ABB. (2000). *Dimensionado de un sistema de accionamiento*. ABB-Guía técnica nº 7 .
- ABB. (2014). *Guía del motor – información técnica básica de motores estándar de baja tensión*.
La guía del motor. ABB.
- Bergas, J. (2000). *Control del motor d inducció considerant els límits del convertidor i del motor*. Tesis. Doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya.Barcelona. .
- Capitaneanu, S. (2001). *Graphical and algebraic synthesis for PWM methods*. In : EPE Vol. 11. #3.
- Caputo, R. (2015). *Motores, conceptos básicos y métodos de arranque Parte II*. Obtenido de www.editores-srl.com.ar
- CENTElsa. (2012). CABLES & TECNOLOGÍA BOLETÍN TÉCNICO - NOVIEMBRE 2012.
CABLES PARA MOTORES CON VARIADORES DE FRECUENCIA VDF. Recuperado de www.centelsa.com.co.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*. Quinta edición, Mc Graw Hill.
- Domingo, C. A. (2015). *Desclasificación de motores asincronos por el contenido de armónicos* .
Proyecto final integrador, Universidad Nacional de Cordoba. .
- Escobar, Ocampo, & Holguín. (2008). Estimación de los parámetros del motor a partir de los datos del fabricante. *Scientia et Technica año XIV, No 39, Universidad Tecnológica de Pereira*.

- Flower, L. (1990). *Controles y automatismos eléctricos*. Bogota-Colombia: Telemecanique de Colombia S.A.
- Gonzales, L. (2004). *Modulación de ancho de pulsos - Una introducción -*. IEEE.
- Grajales, J., Ramírez, J., & Cadavid, D. (2004). Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 31 . *Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión*, 116-123.
- GTC 124. (2009). *Maquinas eléctricas rotatorias. Guía para el diseño y desempeño de motores de corriente alterna diseñados específicamente para la alimentación mediante convertidores*. Bogota D.C: ICONTEC.
- Holtz, J. (1994). *Pulsewidth modulation for electronic power conversion*. Germany: Proceedings of the IEEE, Vol. 82. Wuppertal University.
- IEC 60034-12. (2016). *Rotating electrical machines–12–starting performance of single–speed three–phase cage induction motor*. International Electrotechnical Commission.
- IEC 60947-5-1. (2016). *Low-voltage switchgear and controlgear - Part 5-1: Control circuit devices and switching elements - Electromechanical control circuit devices*. International Electrotechnical Commission.
- Malagon, C. (2014). *Propuesta para el diseño de instalaciones eléctricas de uso final mediante la incorporación de criterios legales, reglamentarios, normativos y técnicos considerando parámetros de compatibilidad electromagnética*. Bucaramanga: Trabajo de investigación para optar el título de magister en ingeniería eléctrica, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER .

- Malinowski, M. (2001). *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*. Ph.D.Thesis, Institute of Control and Industrial Electronics. Faculty of Electrical Engineering. Warsaw University of Technology. Poland.
- Martínez, Á. R. (s.f.). Principios de accionamientos eléctricos. *Conferencias Universidad Industrial de Santander. Departamento de electricidad y electrónica*. Bucaramanga.
- Metz, Dumes, & Thomasset. (2000). Cuaderno Técnico nº 158 . *Calculo de corrientes de cortocircuito*. Schneider electric.
- Motortico. (Febrero de 2004). *Diseño y categoría en motores eléctricos*. Obtenido de www.motortico.com
- NEMA MG1. (2016). *Motor and Generator*. National Electrical Manufacturers Association.
- NTC 2050. (1998). *Código eléctrico colombiano (NTC 2050)*. Bogota, D.C. : ICONTEC.
- Pardo, A. (2004). *Aplicaciones de los convertidores de frecuencia. Estrategias PWM* . Pamplona: JAVA E.U.- ISBN:958-33-6768-0.
- RETIE. (2013). *Reglamento técnico de instalaciones eléctricas*. . Bogota, D.C: Minminas Colombia.
- Sánchez, M. (2009). *Calidad de la energía eléctrica. México*. Instituto Tecnológico de Puebla .
- Sánchez, S. (2008). Accionamientos y actuadores. . *Curso de ingenieros industriales*. Universidad de Huelva.
- Sankaran. (2001). *Power Quality*. CRC PRESS.

Schneider-electric. (s.f.). *Curvas de disparo y tablas de coordinación de protecciones*. Obtenido de www.schneider-electric.es

Siemens. (2008). *Application manual for NEMA motors, Sección 5 parte 7 pag 567*. Obtenido de www.industry.usa.siemens.com

Trashorras, M. (2016). *Sistemas eléctricos en centrales*. Ediciones Paraninfo, SA.

Ventura, N. (2008). Curso de controles eléctricos industriales-Manual técnico 1. *Sistemas de control de motores eléctricos industriales*. Veracruz.

Vidal, B. J. (2002). *Estudio de modelo matemático del motor de inducción trifásico*. Universitat Rovira I Virgili. .

Yamazaki, & Haruishi. (2004). IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 2. En *Stray load loss analysis of induction motor comparison of measurement due to IEEE standard 112 and direct calculation by finite element method* (págs. 543-549). IEEE.

Anexos

Anexo A. Generalidades de los motores de inducción trifásicos.

▪ Funcionamiento del motor de inducción

En un motor de inducción, el campo magnético rotativo induce en el rotor un campo magnético que se opone, resultando un par que hace que el rotor gire en el mismo sentido del giro del campo magnético rotativo. Para que el campo magnético pueda producirse, el rotor tiene que girar a una velocidad un poco menor que la del campo magnético rotativo (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por esto, su velocidad de giro es siempre inferior a la velocidad de sincronismo, aumentando esa diferencia a medida que aumenta la carga resistente del motor. Existen dos términos para describir el movimiento relativo entre el motor y los campos magnéticos uno de ellos es la velocidad de deslizamiento definida como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad de rotación del rotor y el otro es el deslizamiento el cual es la relación entre la velocidad de deslizamiento y la velocidad síncrona (Chapman, 2012).

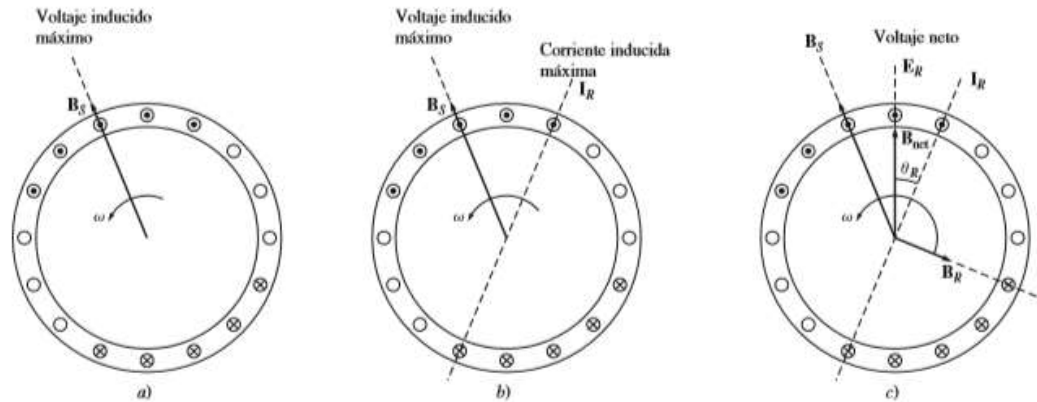


Figura A 1. Desarrollo de un par inducido en un motor de inducción. a) El campo magnético giratorio del estator B_S induce un voltaje en las barras del rotor; b) el voltaje del rotor produce un flujo de corriente en el rotor, que está en retraso con el voltaje debido a la inductancia del rotor; c) la corriente en el rotor produce un campo magnético en el rotor B_R 90° en retraso con respecto a sí mismo y B_R interactúa con B_{net} para producir un par en sentido contrario al de las manecillas del reloj en la máquina. Recuperado de Chapman, S. J. Máquinas eléctricas. Quinta edición, Mc Graw Hill; 2012

El par máximo de un motor de inducción estándar (T_{max} , llamado también par de actuación y par motor crítico) suele ser de 2 a 3 veces el par nominal. El par máximo está disponible con deslizamiento s_{max} , que es superior al deslizamiento nominal.

Cuando un motor opera con frecuencia diferentes de la nominal el rango de frecuencias situado por debajo de la frecuencia nominal se denomina rango de flujo constante. Por encima de la frecuencia/velocidad nominal, el motor funciona en el rango de debilitamiento del campo, donde puede operar a potencia constante.

El par máximo de un motor de inducción es proporcional al cuadrado del flujo magnético ($T_{max} \sim \psi^2$). Ello significa que el par máximo es aproximadamente una constante en el rango de flujo constante. Por encima del punto de debilitamiento del campo, la reducción del par máximo es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia ($T_{max} \sim (f_n/f_{act})^2$). En la siguiente figura se observa dicho comportamiento.

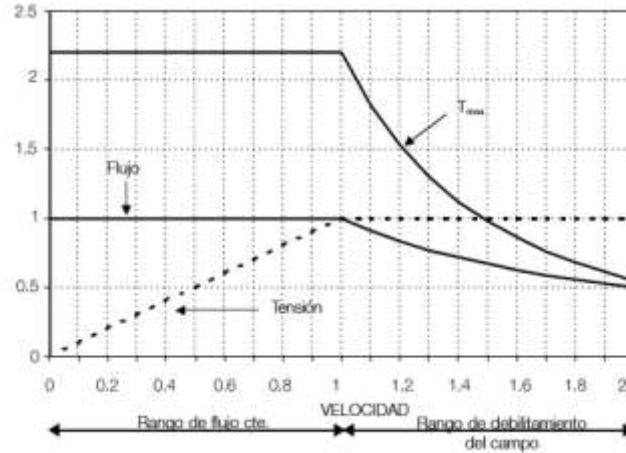


Figura A 2. Par máximo, tensión y flujo en función de la velocidad relativa. Recuperado de Guía técnica No 7, ABB

■ Intensidad del motor (ABB, 2000)

La intensidad de un motor de inducción posee dos componentes: intensidad reactiva (i_{sd}) e intensidad activa (i_{sq}). El componente intensidad reactiva incluye la corriente imanante (i_{magn}) mientras que la intensidad activa es el componente del par encargado de la producción de corriente.

La corriente imanante permanece aproximadamente constante en el rango de flujo constante (por debajo del punto de debilitamiento del campo). En el rango de debilitamiento del campo, la disminución de la corriente imanante es proporcional a la velocidad. Una estimación bastante exacta de la corriente imanante en el rango de flujo constante es la intensidad reactiva (i_{sd}) en el punto nominal del motor.

Por debajo del punto de debilitamiento del campo, los componentes de la intensidad se definen de acuerdo con las siguientes ecuaciones normalizadas con los valores nominales del motor (Corriente nominal, par nominal, velocidad nominal y potencia nominal):

$$I_{sd} = \sin(\varphi_n) + \cos(\varphi_n) \left(\sqrt{(T_{max})^2 - 1} - \sqrt{(T_{max})^2 - (T_{load})^2} \right) [pu] \quad \text{Ecuación 18}$$

$$I_{sq} = (T_{load}) \cos(\varphi_n) [pu] \quad \text{Ecuación 19}$$

La intensidad del motor total es:

$$I_m = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} [pu] \quad \text{Ecuación 20}$$

Una buena aproximación a la intensidad del motor cuando: $0,8T_n \leq T_{Load} \leq 0,7T_{max}$ es:

$$I_m = (T_{load}) [pu] \quad \text{Ecuación 21}$$

Por encima del punto de debilitamiento del campo, los componentes de la intensidad dependen asimismo de la velocidad. Se definen como sigue:

$$I_{sd} = \left(\frac{1}{n} \left(\sin(\varphi_n) + \cos(\varphi_n) \sqrt{(T_{max})^2 - 1} \right) - \cos(\varphi_n) \sqrt{\left(\frac{T_{max}}{n} \right)^2 - (T_{load} * n)^2} \right) [pu] \quad \text{Ecuación 22}$$

$$I_{sq} = (T_{load} * n) \cos(\varphi_n) = (P_{load}) \cos(\varphi_n) [pu] \quad \text{Ecuación 23}$$

La intensidad del motor total es:

$$I_m = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} [pu] \quad \text{Ecuación 24}$$

La intensidad de motor puede aproximarse con bastante exactitud dentro de determinada zona operativa ($0,8T_n(n_n/n) \leq T_{Load} \leq 0,7T_{max}(n_n/n)^2$ y $0,8P_n \leq P_{Load} \leq 0,7P_{max}(n_n/n)$). La intensidad de motor se vuelve proporcional a la potencia relativa. Una fórmula de aproximación para la intensidad es:

$$I_m = (T_{load} * n) = (P_{load}) [pu] \quad \text{Ecuación 25}$$

▪ Modelo del motor de inducción.

Existe una gran cantidad de modelos de máquinas de inducción, generalmente estos modelos se clasifican en estáticos y dinámicos, lineales y no lineales, parciales o integrales.

El uso de cada modelo está determinado por el tipo de análisis que se efectúa sobre la máquina y por el tipo de respuesta esperado (Vidal, 2002).

Para entender el comportamiento del motor de inducción frente diferentes dispositivos se utilizará el clásico circuito del motor de inducción el cual es modelado con las resistencias y reactancias del rotor y estator además de la rama de magnetización, dicho circuito es ampliamente usado en estado estacionario para la determinación de las características de funcionamiento de la máquina. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar el circuito equivalente de un motor de inducción.

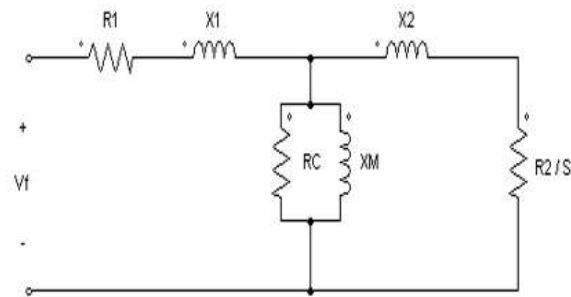


Figura A 3. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.

Donde R_1 y X_1 representan la impedancia del estator, R_2 y X_2 representan las impedancias del rotor vistas desde el estator y R_C y X_M el circuito de magnetización.

Algunos de los métodos más usados para determinar estos parámetros son (Escobar, Ocampo, & Holguín, 2008):

- Método de los elementos finitos
- Prueba de vacío y de rotor bloqueado.
- Métodos de respuesta transitoria.
- Datos de catálogo.
- Utilización de algoritmos de identificación.

La ejecución de cualquiera de estos métodos depende de la disponibilidad de recursos.

▪ Pérdidas de potencia en un motor de inducción.

Además de los parámetros anteriormente descritos es necesario comprender el motor desde el punto de vista de la eficiencia para entender la diferencia entre la potencia eléctrica que consume un motor y la potencia mecánica que esta máquina es capaz de entregar.

Los motores eléctricos de inducción presentan diferentes escenarios de pérdidas de potencia, las cuales se pueden clasificar como (Yamazaki & Haruishi, 2004):

- Mecánicas: Producto de la fricción.
- Primarias de cobre: Las pérdidas de Joule en el devanado primario.
- Secundarias de cobre: Las pérdidas de Joule del rotor
- Pérdidas en el hierro: Las ocasionadas por histéresis y corrientes de Eddy en los núcleos del rotor y del estator
- Dispersas

La relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada se representa en la Ecuación 26, definida como eficiencia de la máquina.

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}} \quad \text{Ecuación 26}$$

Si conocemos el circuito equivalente del motor y los parámetros de la fuente de alimentación podemos calcular la corriente de entrada, las pérdidas, las potencias transferidas en función del deslizamiento además del par inducido en el rotor de la máquina el cual se genera por la conversión de potencia eléctrica en potencia mecánica. Este par difiere del par real en los terminales del motor debido a las pérdidas mecánicas.

▪ Clasificación de motores de inducción.

La National Electric Manufacturers Association (NEMA) ha desarrollado un sistema de identificación mediante letras para motores comerciales. Según características par-velocidad para cada diseño (NEMA MG1, 2016).

- NEMA – DISEÑO A: Motor de inducción, jaula de ardilla de propósito general. Su par motor se encuentra entre el 115% y 150% para motores de alta velocidad cuando se arrancan a tensión plena, la corriente de arranque a tensión plena estará entre 500 y 1000% dependiendo del tamaño y de la velocidad nominal, este motor tiene un par motor máximo muy elevado y, por lo tanto, funcionara a través de cargas máximas elevadas.

Aplicaciones típicas: cargas de velocidad constante donde no se necesita un par motor de arranque excesivo y donde se tolera una corriente de arranque elevada comúnmente visto en ventiladores, aspiradoras, bombas centrifugas máquinas – herramientas, transmisiones; bajo

en costos puede requerir arrancador a tensión reducida, no debe estar sujeto a sobre cargas sostenidas debido al calentamiento.

- NEMA – DISEÑO B: Motor de par de arranque normal, con baja corriente de arranque. Las características designadas de este motor se obtienen colocando las barras del rotor en las ranuras más profundas y que tengan usualmente un rotor de arrollamiento doble, estando las barras de resistencia elevada para el arranque en la parte superior cerca del entrehierro. La corriente de arranque a tensión plena estará con casi el 75% de la clase (A), según la construcción de este motor el par producido tiene casi el mismo de arranque o ligeramente mayor que el de la clase (A).

Aplicaciones típicas: las aplicaciones son similares a las de la clase A pero su ventaja sobre esta es: menor corriente de arranque pero factor de potencia levemente más bajo.

- NEMA -- DISEÑO C: Motor de par de arranque elevado, baja corriente de arranque. Este motor tiene doble jaula de ardilla, y tiene una corriente de arranque ligeramente menor que la Clase B, pero el par motor de arranque es mucho mayor, hasta 240% y el par motor máximo es menor que el de la Clase (A).

Aplicaciones típicas: Cargas de velocidad constante que requieren un par motor razonable y de muy baja corriente de arranque, comúnmente vistos en transportadores, compresores, trituradoras agitadores y bombas de movimiento alternativo. Par motor máximo en reposo.

- NEMA – DISEÑO D: Motor de deslizamiento elevado. Estos motores están a menudo subdivididos por los fabricantes en régimen nominal intermitente de deslizamiento elevado y

régimen nominal continuo de deslizamiento medio. El motor de deslizamiento medio; tiene un par motor acelerando promedio muy elevado se utilizan deslizamientos elevados para casos típicos (ascensores, montacargas etc.) cargas intermitentes.

Se aplica a prensas, cortadoras, punzón, cizallas, etc., que tienen volantes para proporcionar energía a la carga durante el golpe de trabajo. Este tipo de motor tiene el mayor par de arranque de todos los motores polifásicos, y la máxima capacidad de aceleración.

La International Electrotechnical Commission (IEC), establece tres categorías en su estándar IEC 60034-12:2016 estos son:

- Categoría N: Par de arranque normal, corriente en el arranque normal, bajo deslizamiento. Constituyen la mayoría de los motores encontrados en el mercado y se prestan para ser utilizados moviendo cargas normales como son bombas, máquinas operatrices, ventiladores.
- Categoría H: Par de arranque alto, corriente de arranque normal, bajo deslizamiento. Usados para cargas que exigen mayor par de arranque como son zarandas, transportadores, cargadores, cargas con inercia alta, molinos, etc.
- Categoría D: Par de arranque alto, corriente de arranque normal, alto deslizamiento (más de 5%). Son usados en prensas excéntricas y máquinas similares, donde la carga presenta picos periódicos. También son usados en elevadores y cargas que necesitan un par de arranque muy alto y corriente de arranque limitada.
- **Tamaño de motores (Frame) (ABB, 2014)**

Las dimensiones de los motores eléctricos son estandarizadas de acuerdo con la IEC-60072. En estas normas, la dimensión básica para la estandarización de las dimensiones de montaje de

máquinas eléctricas girantes es la altura del plano de la base hasta el centro de la punta del eje. El código alfanumérico para el armazón según la IEC indica directamente la dimensión en milímetros (mm) medida desde la base del motor hasta el centro del eje. Esta dimensión se denomina "H". Un motor de FRAME 160L tendrá 160mm de altura del eje. Los sufijos S, M y L indican la longitud de los agujeros de anclaje (dimensión "B"): pequeño, mediano y largo, respectivamente.

Mientras en el FRAME NEMA, la altura del eje se denomina "dimensión D". Se obtiene dividiendo los dos primeros dígitos del FRAME entre cuatro (4). Un motor de FRAME NEMA 284T, tendrá una altura del eje de: $28/4 = 7$ pulgadas (180 mm). El tercer y cuarto dígito indica la longitud entre los agujeros de anclaje del motor o dimensión "2F". El sufijo "T" indica que es un motor de la última revisión de NEMA.

Tabla A 1.
Dimensiones de los motores de inducción según IEC

IEC NEMA	H D	A 2E	B 2F	C BA	K H	Ø D Ø U	E N-W
63	63	100	80	40	7	11j6	23
71	72	112	90	45	7	14j6	30
80	80	125	100	50	10	19j6	40
90S	90	140	100	56	10	24j6	50
143T	88,9	139,7	101,6	57,15	8,7	22,2	57,15
90L	90	140	125	56	10	24j6	50
145T	88,9	139,7	127	57,15	8,7	22,2	57,15
100L	100	160	140	63	12	28j6	60
112S	112	190	140	70	12	28j6	60
182T	114,3	190,5	114,3	70	10,3	28,6	69,9
112M	112	190	140	70	12	28j6	60
184T	114,3	190,5	139,7	70	10,3	28,6	69,9
132S	132	216	140	89	12	38k6	80
213T	133,4	216	139,7	89	10,3	34,9	85,7
132M	132	216	178	89	12	38k6	80
215T	133,4	216	177,8	89	10,3	34,9	85,7
160M	160	254	210	108	15	42k6	110
254T	158,8	254	209,6	108	13,5	41,3	101,6
160L	160	254	254	108	15	42k6	110
256T	158,8	254	254	108	13,5	41,3	101,6
180M	180	279	241	121	15	48k6	110
284T	180	279,4	241,3	121	13,5	47,6	117,5
180L	180	279	279	121	15	48k6	110
286T	177,8	279,4	279,4	121	13,5	47,6	117,5
200M	200	318	267	133	19	55m6	110
324T	203,2	317,5	266,7	133	16,7	54	133,4

200L	200	318	305	133	19	55m6	110
326T	203,2	317,5	304,8	133	16,7	54	133,4
225S	225	356	286	149	19	60m6	140
364T	228,6	355,6	285,8	149	19	60,3	149,2
250S	250	406	311	168	24	65m6	140
404T	254	406,4	311,2	168	20,6	73	184,2
250M	250	406	349	168	24	65m6	140
405T	254	406,4	349,2	168	20,6	73	184,2
280S	280	457	368	190	24	65m6	140
444T	279,4	457,2	368,4	190	20,6	73	184,2
280M	280	457	419	190	24	75m6	140
445T	279,4	457,2	419,1	190	20,6	85,7	215,9
315S	315	508	406	216	28	80m6	170
504Z	317,5	508	406,4	215,9	31,8	92,1	269,9
315M	315	508	457	216	28	80m6	170
505Z	317,5	508	457,2	215,9	31,8	92,1	269,9
355M	355	610	560	254	28	100m6	210
586	368,3	584,2	558,8	254	30	98,4	295,3
355L	355	610	630	254	28	100m6	210
587	368,3	584,2	635	254	30	98,4	295,3

En la siguiente figura se describen las dimensiones del motor según norma IEC.

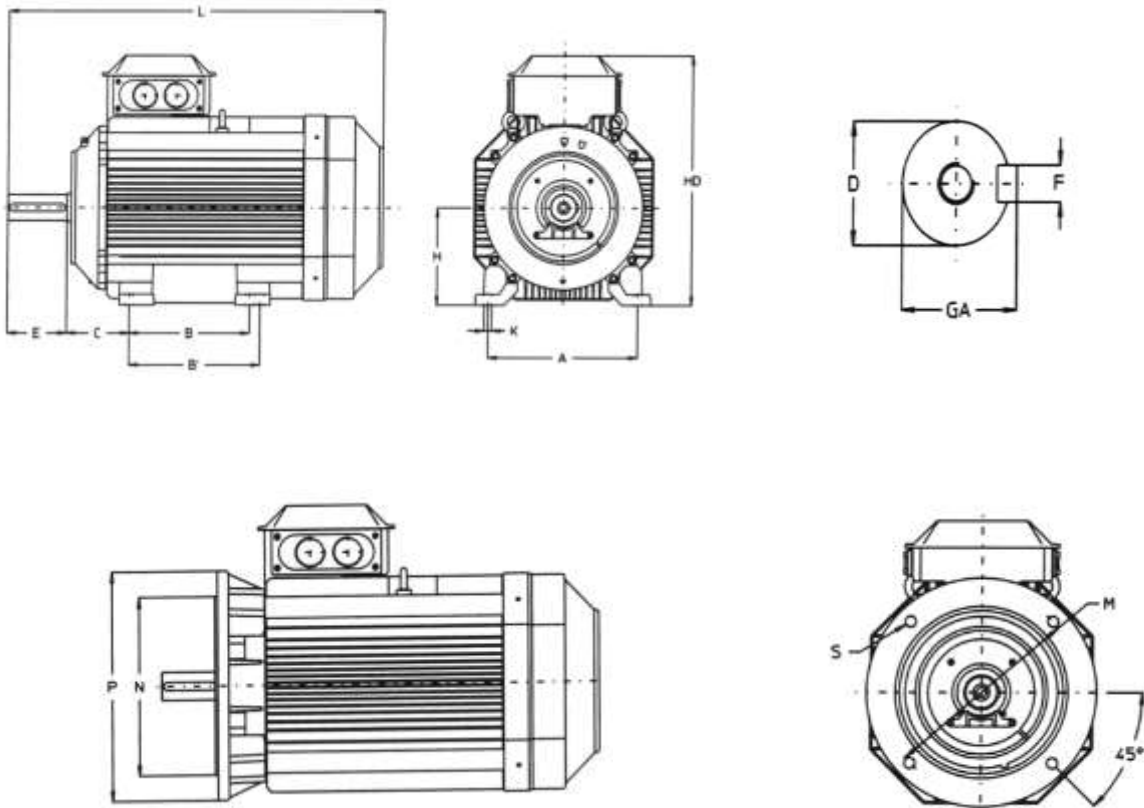


Figura A 4. Cotas de los motores de inducción según norma IEC

Donde:

A = Distancia entre los centros de los agujeros de fijación (visto desde el lado acople)

B = Distancia entre los centros de los agujeros de fijación (visto desde el lateral)

B' = Distancia entre los centros de los agujeros de fijación auxiliares

C = Distancia desde el resalte del eje en el lado acople hasta el centro de los agujeros de fijación de la pata más próxima

D = Diámetro de la salida de eje en el lado acople

E = Longitud de la salida del eje desde el resalte hasta el extremo del eje

F = Anchura del chavetero desde la salida del eje al lado acople

GA = Distancia desde la parte superior de la chaveta a la superficie opuesta de la salida de eje en el lado acople

H = distancia desde el centro del eje hasta la parte inferior de las patas

HD = Distancia desde la parte superior del cáncamo, la caja de bornes o la parte más saliente montada en la parte superior del motor hasta la parte inferior de las patas

K = Diámetro de los agujeros de fijación o anchura de las ranuras en las patas del motor

L = Longitud total del motor con una única salida de eje

M = Diámetro de los agujeros de fijación de la brida

N = Diámetro del encaste

P = Diámetro exterior de la brida o, en caso de perfil no circular, el doble de la dimensión radial máxima

S = Diámetro de los agujeros de fijación en el montaje de la brida o diámetro nominal de la rosca.

Existe cierta relación entre la capacidad del motor y el tamaño lo cual se describe en la siguiente tabla.

Tabla A 2.
Relación entre la potencia y el tamaño del motor.

Tamaño (Frame-IEC)	Potencia en kW (cv)			
	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
56	0,09-0,012	0,06-0,09	-	-
63	0,18-0,25 (1/5-1/3)	0,12-0,18	-	-
71	0,37-0,55 (1/2-3/4)	0,25-0,37 (1/3-1/2)	-	-
80	0,75-1,1 (1-1½)	0,55-0,75 (3/4-1)	0,37-0,55 (1/2-3/4)	-
90S	1,5 (2)	1,1 (1½)	0,75 (1)	0,37 (1/2)
90L	2,2 (3)	1,5 (2)	1,1 (1½)	0,55 (3/4)
100L	3 (4)	2,2-3 (3-4)	1,5 (2)	0,75-1,1 (1-1½)
112M	4 (5 1/3)	4 (5 1/3)	2,2 (3)	1,5 (2)
132S	5,5-7,5 (7½-10)	5,5 (7½)	3 (4)	2,2 (3)
132M	-	7,5 (10)	4-5,5 (5 1/3-7½)	3 (4)
160M	11-15 (15-20)	11 (15)	7,5 (10)	4-5,5 (5 1/3-7½)
160L	18,5 (25)	15 (20)	11 (15)	7,5 (10)
180M	22 (30)	18,5 (25)	-	-
180L	-	22 (30)	15 (20)	11 (15)
200L	30-37 (40-50)	30 (40)	18,5-22 (25-30)	15 (20)
225S	-	37 (50)	-	18,5 (25)
225M	45 (60)	45 (60)	30 (40)	22 (30)
250M	55 (75)	55 (75)	37 (50)	30
280S	75 (100)	75 (100)	45 (60)	37 (50)
280M	90 (125)	90 (125)	55 (75)	45 (60)
315S	110 (150)	110 (150)	75 (100)	55 (75)
315M	132 (180)	132 (180)	90 (125)	75 (100)
355	-	-	-	-
400	-	-	-	-

- Tipos de servicio estandarizados (ABB, 2014).

Según la IEC 60034-1, es el grado de regularidad de la carga a la que el motor es sometido. Los motores normales son proyectados para régimen continuo, (la carga es constante), por tiempo indefinido, e igual a la potencia nominal del motor. En los casos en que la carga no varía o en los cuales varía de forma previsible, el régimen podrá ser indicado numéricamente o por medio de gráficos que representan la variación en función del tiempo. Cuando la secuencia real de los valores en el tiempo sea indeterminada, deberá ser indicada una secuencia ficticia no menos

severa que la real. La utilización de otro régimen de arranque en relación con el informado en la placa de identificación podrá llevar al sobrecalentamiento del motor y consecuentes daños al mismo. Los tipos de servicio o régimen de trabajo se describen a continuación considerando los siguientes símbolos.

P = potencia de salida

N = funcionamiento en condiciones

F = frenado eléctrico

nominales

D = aceleración

R = en reposo en estado desconectado

V = funcionamiento sin carga/ en vacío

P_N = carga completa

FDC = Factor de duración del ciclo.

- Régimen continuo, S1: Funcionamiento a carga constante de duración suficiente para alcanzar el equilibrio térmico. Designación S1

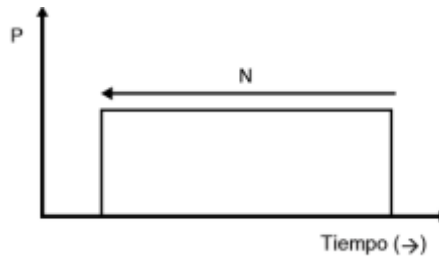


Figura A 5. Comportamiento del sistema en régimen continuo.

- Servicio de corta duración, S2: 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. Ejemplo de designación: S2 60 min.

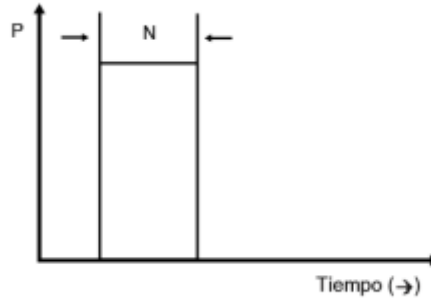


Figura A 6. Comportamiento del sistema en régimen de corta duración.

- Servicio intermitente, S3: 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.

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. Ejemplo de designación: S3 25%

$$FDC = \frac{N}{N + R} * 100\%$$

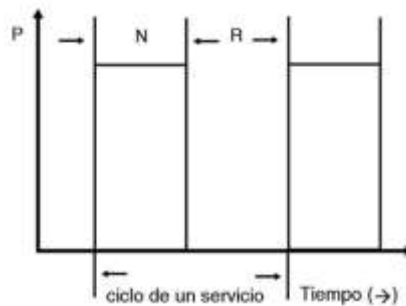


Figura A 7. Comportamiento del sistema en régimen intermitente

- Servicio intermitente con arranque, S4: 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.

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.

Para definir completamente el tipo de servicio son necesarios los siguientes parámetros: el factor de duración del ciclo (FDC), el número de ciclos de servicio por hora (c/h), el momento de inercia de la carga J_L y el momento de inercia del motor J_M .

Ejemplo de designación: S4 25% 120 c/h $J_L = 0,2 \text{ kgm}^2$ $J_M = 0,1 \text{ kgm}^2$

$$FDC = \frac{D + N}{D + N + R} * 100\%$$

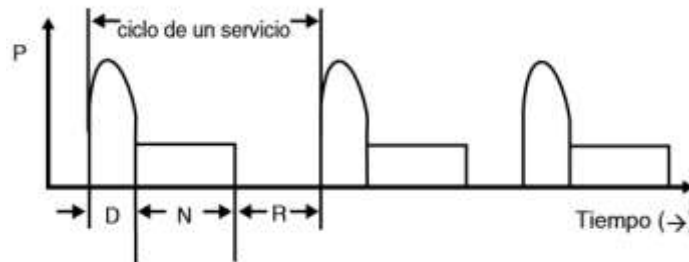


Figura A 8. Comportamiento del sistema en régimen intermitente con arranque.

- Servicio intermitente con arranque y frenado eléctrico, S5: 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 y un período de frenado eléctrico rápido y un período de reposo en estado desconectado.

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 por la carga o por el frenado mecánico, por lo que el motor no se carga térmicamente.

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 J_L y el momento de inercia del motor J_M . Ejemplo de designación: S5 40% 120 c/h $J_L = 2,6 \text{ kgm}^2$ $J_M = 1,3 \text{ kgm}^2$

$$FDC = \frac{D + N + F}{D + N + F + R} * 100\%$$

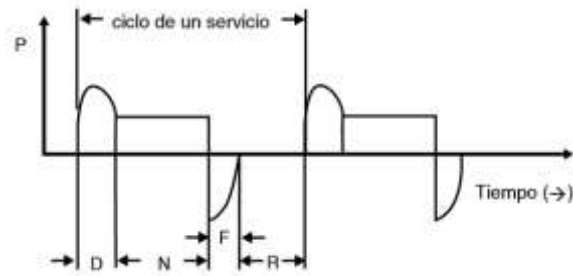


Figura A 9. Comportamiento del sistema en régimen intermitente con arranque y frenado.

- Servicio periódico con funcionamiento ininterrumpido, S6: 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. 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. Ejemplo de designación: S6 40%

$$FDC = \frac{N}{N + V} * 100\%$$

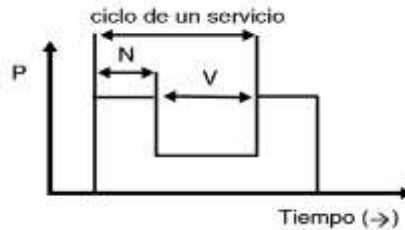


Figura A 10. Comportamiento del sistema en régimen periódico con funcionamiento continuo.

- Servicio periódico de funcionamiento continuo con frenado eléctrico, S7: 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 a contracorriente. Los ciclos de servicio son demasiado cortos para alcanzar el equilibrio térmico.

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 J_L y el momento de inercia del motor J_M . Ejemplo de designación: S7 500 c/h $J_L = 0,08 \text{ kgm}^2$ $J_M = 0,08 \text{ kgm}^2$

$$FDC = \frac{N}{N + V} * 100\%$$

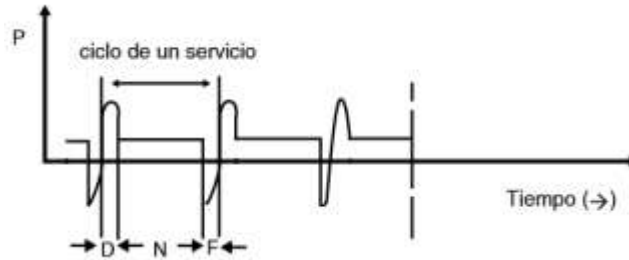


Figura A 11. Comportamiento del sistema en régimen continuo con frenado

- Servicio periódico ininterrumpido con variaciones de carga y de velocidad, S8: 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. Los ciclos de servicio son demasiado cortos para alcanzar el equilibrio térmico. Este tipo de servicio se utiliza, por ejemplo, en motores de polos conmutables. 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 J_L y el momento de inercia del motor J_M , y la carga, la velocidad y el factor de duración del ciclo para cada velocidad de rotación. Ejemplo de designación: S8 30 c/h $J_L = 63,8 \text{ kgm}^2$ $J_M = 2,2 \text{ kgm}^2$

24 kW 740r/min 30%

60 kW 1460r/min 30%

45 kW 980r/min 40%

$$FDC1 = \frac{D + N1}{D + N1 + F1 + N2 + F2 + N3} * 100\%$$

$$FDC2 = \frac{F1 + N2}{D + N1 + F1 + N2 + F2 + N3} * 100\%$$

$$FDC3 = \frac{F2 + N3}{D + N1 + F1 + N2 + F2 + N3} * 100\%$$

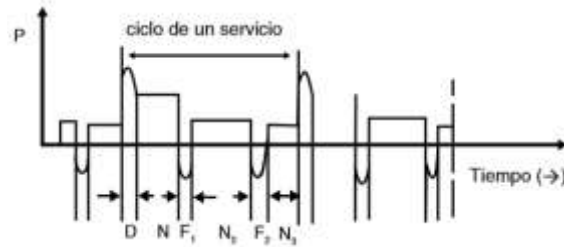


Figura A 12. Comportamiento del sistema en régimen continuo con cambios en la carga y la velocidad.

- Servicio con variaciones no periódicas de la carga y de la velocidad, S9: Servicio en el cual, generalmente, la carga y la velocidad tienen una variación no periódica dentro del margen de funcionamiento permitido. Este servicio presenta con frecuencia sobrecargas que pueden exceder ampliamente los valores en plena carga. Para este tipo de servicio, el concepto de sobrecarga debería basarse en valores adecuados de plena carga. Se designa con S9.

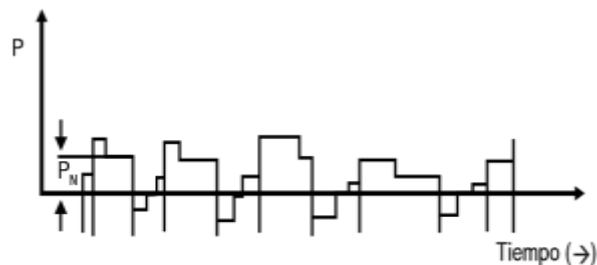


Figura A 13. Comportamiento del sistema en régimen no periódico de cambios de la carga y la velocidad.

- Servicio con cargas constantes distintas, S10: Régimen consistiendo en un número específico de valores distintos de cargas (o cargas equivalentes) y, si es aplicable, velocidad, siendo cada combinación carga/velocidad mantenida por un tiempo suficiente para permitir que la máquina alcance el equilibrio térmico. La carga mínima durante un ciclo de régimen puede tener el valor cero (funcionamiento en vacío o reposo sin tensión). Se designa con S10.

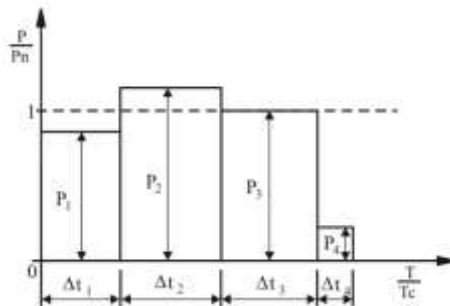


Figura A 14. Comportamiento del sistema en régimen continuos de cargas distintas.

Anexo B. Códigos en Scilab

Códigos utilizados para simular el comportamiento del par y corriente en función de la velocidad y corriente en función del tiempo para los diferentes tipos de arranques analizados en este trabajo, la simulación del espectro de armónicos de las señales de tensión inyectadas al motor por el variador de frecuencia para sistemas con control SPWM, la curva de factor de tensión armónica en función de la frecuencia de la señal portadora y las curvas de respuestas del relé para diferentes corrientes de precargas.

Arranque directo

Codigo 1. Comportamiento característico de par y corriente en función de la velocidad.

```
clear
clc

// Datos del circuito equivalente
R1=0.2317; // Resistencia en el estator
X1=0.5409; // Reactancia en el estator
XM=19.943; // Impedancia de magnetización
R2=0.217; // Resistencia en el rotor
X2=0.5409; // Reactancia en el rotor

// Datos de placa
Vl= 460; // Voltaje de línea
f=60; // Frecuencia eléctrica
P=4; // Numero de polos
nrot=1760 // Velocidad mecánica en rpm
Pm=25; // potencia mecánica hp
ef=0.89 // eficiencia
```

```

pf=0.88 // factor de potencia

// Cálculos según datos de placa
Vf= Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase
nsinc=120*f/P // velocidad síncrona en rpm
ndes=nsinc-nrot; // velocidad de deslizamiento
des=ndes/nsinc // Deslizamiento
Pout1= Pm*746; // Potencia mecánica en W
Pin1=Pout1/ef // Potencia de entrada en W
Pper1=Pin1-Pout1 // Perdidas de potencia en W
Sin1=Pin1/pf // Potencia aparente de entrada en VA
Qin=sin(acos(pf))*Sin1 // Potencia reactiva del circuito

// Cálculos según circuito equivalente
Vth=Vf*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin
Zth=(XM*%i*(R1+X1*%i))/(R1+(X1+XM)*%i)// impedancia de Thevenin
I2=Vth/(Zth+X2*%i+(R2/des))// Corriente en el rotor
PGA=abs(3*I2^2*(R2/des))// Potencia de entrehierro
Wsinc=nsinc*2*%pi/(60)// Velocidad de sincronismo
PRcu=abs(3*I2^2*(R2))// Perdidas por efecto joule en el cobre del rotor
Pconv=PGA-PRcu//Potencia convertida
Ztot=(XM*%i*(X2*%i+R2/des)+(R1+X1*%i)*(R2/des+%i*(X2+XM)))/(R2/des+%i*(X2+XM))// Impedancia total
I=Vf/Ztot// Corriente de entrada en los bornes del motor en estado estable.
ang=atan(imag(conj(I))/real(I))
pf=cos(ang)// Factor de potencia
Pin=sqrt(3)*Vl*abs(I)*pf// Potencia de entrada
PScu=abs(3*I^2*(R1))//Perdidas en el cobre del estator
Php=Pconv/746// Potencia en hp entregados por el motor sin tener en cuenta las perdidas mecánicas.
ef=abs(Pconv/Pin)//eficiencia
nmaxpu=1-des//Velocidad nominal en pu

//Calculo de vector de corriente y grafica de corriente VS Desplazamiento o velocidad

```

```

i=1
for nR=0:0.0025:nmaxpu
    if nR<=nmaxpu
        I1(i)=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))
        Tind(i)=(3*Vth^2*R2/(1-nR))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-nR))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
        nR1(i)=nR
        Load(i)=(3*Vth^2*R2/(des))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(des))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
    end
    i=i+1
end

//Grafica

plot2d(nR1,[I1,Tind,Load],[2 4 5],leg='Corriente@Par Motor@Par Resistente')
    title("Par y Corriente vs Velocidad")
    xlabel("Velocidad mecánica en pu")
    ylabel("Par inducido [Nm] y Corriente [A]")

```

Codigo 2. Comportamiento característico de la corriente en función del tiempo.

```

clc
clear
R1=0.641; // Resistencia en el estator
X1=1.106; // Reactancia en el estator
XM=26.3; // Impedancia de magnetización
R2=0.332; // Resistencia en el rotor
X2=0.464; // Reactancia en el rotor

// Datos de placa
Vl= 460; // Voltaje de línea

```

```

fr=60; // Frecuencia eléctrica

P=4; // Numero de polos

nrot=1760 // Velocidad mecánica en rpm

Pm=20; // potencia mecánica hp

ef=0.89 // eficiencia

pf=0.88 // factor de potencia

// Calculos segun datos de placa

Vf= Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase

nsinc=120*fr/P // velocidad síncrona en rpm

ndes=nsinc-nrot; // velocidad de deslizamiento

des=ndes/nsinc // Deslizamiento

// Calculos segun circuito equivalente

Vth=Vl*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin

Vthf=Vf*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2))

Zth=(XM*%i*(R1+X1*%i))/(R1+(X1+XM)*%i)// Impedancia de Thevenin

Wsinc=nsinc*2*%pi/(60)//Velocidad de sincronismo

Ztot=(XM*%i*(X2*%i+R2/des)+(R1+X1*%i)*(R2/des+%i*(X2+XM)))/(R2/des+%i*(X2+XM))//Impedancia total

nmaxpu=1-des//Velocidad nominal en pu

// Calculo de constante de inercia

J=0.8 // kg*m^2 momento de inercia

Mn=(3*Vth^2*R2/(des))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(des))^2+(imag(Zth)+X2)^2))

nmaxpu=1-des//Momento motor

TJN=J*(Wsinc/Mn)

//Calculo de vector de corriente y grafica de corriente VS Desplazamiento o velocidad

function y=f(x)

    y=TJN*Mn/((3*Vth^2*R2/(1-x))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-x))^2+(imag(Zth)+X2)^2)))

endfunction

function z=f1(x)

    z=TJN*Mn/((3*Vth^2*R2/(1-x))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-x))^2+(imag(Zth)+X2)^2)))

```

```

endfunction

//Vectores
i=0
for nR=0:0.001:nmaxpu
    i=i+1
    nR1(i)=nR
    Iy(i)=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))
    ID(i)=Iy(i)
    Time(i)=intg(0,nR1(i),f)
    ID1(i)=abs(ID(i))*sin(2*%pi*fr*Time(i))
end

for a=(max(Time)+max(Time)/length(Time)):max(Time)/length(Time):1.5*max(Time)
    q=length(Time)+1
    IDest=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(des))+(R1+X1*%i)*(R2/(des)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))
    ID1(q)=(IDest)*sin(2*%pi*fr*a)
    Time(q)=a
end

//Graficas
plot2d(Time,[ID1],[5],leg='I En función del tiempo')
title("Corriente vs Tiempo")
xlabel("Tiempo en segundos")
ylabel("Corriente [A]")

```

Arranque estrella triangulo.

Codigo 3. *Comportamiento característico de par y corriente en función de la velocidad.*

```

clc
clear
R1=0.641; // Resistencia en el estator

```

```

X1=1.106; // Reactancia en el estator
XM=26.3; // Impedancia de magnetización
R2=0.332; // Resistencia en el rotor
X2=0.464; // Reactancia en el rotor

// Datos de placa
Vl= 460; // Voltaje de línea
f=60; // Frecuencia eléctrica
P=4; // Numero de polos
nrot=1760 // Velocidad mecánica en rpm
Pm=20; // potencia mecánica hp
ef=0.89 // eficiencia
pf=0.88 // factor de potencia

// Cálculos según datos de placa
Vf= Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase
nsinc=120*f/P // velocidad síncrona en rpm
ndes=nsinc-nrot; // velocidad de deslizamiento
des=ndes/nsinc // Deslizamiento

// Cálculos según circuito equivalente
Vth=Vl*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin
Vthf=Vf*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2))
Zth=(XM*%i*(R1+X1*%i))/(R1+(X1+XM)*%i) // Impedancia de Thevenin
Wsinc=nsinc*2*%pi/(60) // Velocidad síncrona
Ztot=(XM*%i*(X2*%i+R2/des)+(R1+X1*%i)*(R2/des+%i*(X2+XM)))/(R2/des+%i*(X2+XM)) // Impedancia total
I=Vl/Ztot // Corriente de entrada estado estable
nmaxpu=1-des // Velocidad nominal

// Calculo de vector de corriente y grafica de corriente VS Desplazamiento o velocidad
i=1

```

```

for nR=0:0.0025:nmaxpu
    if nR<=0.9 // conexion en y
        I1(i)=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))
        Tind(i)=(3*Vth^2*R2/(1-nR))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-nR))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
        Load(i)=(3*Vth^2*R2/(des))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(des))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
    else nR>0.9 // Conexion en D
        I1(i)=3*Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-
nR)+%i*(X2+XM)))
        Load(i)=(3*Vth^2*R2/(des))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(des))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
        Tind(i)=(3*(Vth)^2*R2/(1-nR))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-nR))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
    end

    nR1(i)=nR
    i=i+1
end

plot2d(nR1,[I1 Tind Load],[2 3 5],leg='Corriente@Par Motor@Par Resistente')
title("Par y Corriente vs Velocidad")
xlabel("Velocidad mecanica en pu")
ylabel("Par [N*m] y Corriente [A]")

```

Codigo 4. Comportamiento característico de la corriente en función del tiempo.

```

clc
clear
R1=0.641; // Resistencia en el estator
X1=1.106; // Reactancia en el estator
XM=26.3; // Impedancia de magnetización
R2=0.332; // Resistencia en el rotor
X2=0.464; // Reactancia en el rotor

```

```

// Datos de placa
Vl= 460; // Voltaje de línea
fr=60; // Frecuencia eléctrica
P=4; // Numero de polos
nrot=1760 // Velocidad mecánica en rpm
Pm=20; // potencia mecánica hp
ef=0.89 // eficiencia
pf=0.88 // factor de potencia

// Cálculos según datos de placa
Vf= Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase
nsinc=120*fr/P // velocidad síncrona en rpm
ndes=nsinc-nrot; // velocidad de deslizamiento
des=ndes/nsinc // Deslizamiento

// Cálculos según circuito equivalente
Vth=Vl*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin
Vthf=Vf*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2))
Zth=(XM*%i*(R1+X1*%i))/(R1+(X1+XM)*%i) // Impedancia de Thevenin
Wsinc=nsinc*2*%pi/(60) // Velocidad síncrona
Ztot=(XM*%i*(X2*%i+R2/des)+(R1+X1*%i)*(R2/des+%i*(X2+XM)))/(R2/des+%i*(X2+XM)) // Impedancia total
I=Vl/Ztot // Corriente del sistema
nmaxpu=1-des

// Calculo de constante de inercia
J=0.8 // kg*m^2 momento de inercia
Mn=(3*Vth^2*R2/(des))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(des))^2+(imag(Zth)+X2)^2)) // Momento motor
nmaxpu=1-des // Velocidad nominal
TJN=J*(Wsinc/Mn) // Constante de tiempo

// Calculo de vector de corriente y grafica de corriente VS Desplazamiento o velocidad
function y=f(x)

```

```

y=TJN*Mn/(((3*Vth^2*R2/(1-x))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-x))^2+(imag(Zth)+X2)^2)))
endfunction

function z=f1(x)
z=TJN*Mn/(((3*Vth^2*R2/(1-x))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-x))^2+(imag(Zth)+X2)^2)))
endfunction

//Vectores
i=0
for nR=0:0.001:nmaxpu
i=i+1
nR1(i)=nR
if nR<=0.9
ly(i)=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))
ID(i)=ly(i)
Time(i)=intg(0,nR1(i),f)
ID1(i)=abs(ID(i))*sin(2*%pi*fr*Time(i))
else
ID(i)=3*Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-
nR)+%i*(X2+XM)))
Time(i)=intg(0,nR1(i),f1)
ID1(i)=abs(ID(i))*sin(2*%pi*fr*Time(i))
end
end

for a=(max(Time)+max(Time)/length(Time)):max(Time)/length(Time):1.5*max(Time)
q=length(Time)+1
IDest=3*Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(des))+(R1+X1*%i)*(R2/(des)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))
ID1(q)=(IDest)*sin(2*%pi*fr*a)
Time(q)=a
end

```

```
//Graficas
plot2d(Time,[ID1],[5],leg='1 En función del tiempo')
title("Corriente vs Tiempo")
xlabel("Tiempo en segundos")
ylabel("Corriente [A]")
```

Arranque suave.

Codigo 5. Comportamiento característico de par y corriente en función de la velocidad.

```
clc
clear

// Datos del circuito equivalente
R1=0.2317; // Resistencia en el estator
X1=0.5409; // Reactancia en el estator
XM=19.943; // Impedancia de magnetización
R2=0.217; // Resistencia en el rotor
X2=0.5409; // Reactancia en el rotor

// Datos de placa
Vl= 460; // Voltaje de línea
f=60; // Frecuencia eléctrica
P=4; // Numero de polos
nrot=1760 // Velocidad mecánica en rpm
Pm=20; // potencia mecánica hp
ef=0.89 // eficiencia
pf=0.88 // factor de potencia
Php = 25 // hp conexión en y
J=0.1 // kg*m^2 momento de inercia
```

```

// Cálculos según datos de placa
Vf= Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase
nsinc=120*f/P // velocidad síncrona en rpm
omeg = 2*%pi*nsinc/60
ndes=nsinc-nrot; // velocidad de deslizamiento
des=ndes/nsinc // Deslizamiento

// Cálculos según circuito equivalente
Vth=Vf*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin
Zth=(XM*%i*(R1+X1*%i))/(R1+(X1+XM)*%i)// Impedancia de Thevenin
Wsinc=nsinc*2*%pi/(60)// Velocidad en radianes
Ztot=(XM*%i*(X2*%i+R2/des)+(R1+X1*%i)*(R2/des+%i*(X2+XM)))/(R2/des+%i*(X2+XM))//Impedancia total
I=Vf/Ztot// Corriente en estado estable
nmaxpu=1-des// Velocidad nominal en pu

//Calculo de vector de corriente y grafica de corriente VS Desplazamiento o velocidad
//Dimensión del vector
k=1
for nk=0:0.001:nmaxpu
    Ik(k)=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nk))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nk)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nk)+%i*(X2+XM)))
    k=k+1
end

//tensiones variables
Vini=200/sqrt(3)//tensión de inicio
Vfin=460/sqrt(3)//tensión de operación
Vi=Vini:((Vfin-Vini)/(length(Ik)-1)):Vfin;//Vector de intervalo de tensiones

//Vectores
i=1
for nR=0:0.001:nmaxpu

```

```

Vth1(i)=Vi(i)*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin variable
if nR<=nmaxpu
    IS(i)=Vi(i)/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-
nR)+%i*(X2+XM)))
    nR1(i)=nR
    Tindv(i)=(3*Vth1(i)^2*R2/(1-nR))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-nR))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
    Load(i)=(3*Vth^2*R2/(des))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(des))^2+(imag(Zth)+X2)^2))
end
i=i+1
end

//Graficas
plot2d(nR1,[IS,Tindv,Load],[2 4 5],leg='Corriente@Par Motor@Par de Carga')
title("Par y Corriente vs Velocidad")
xlabel("Velocidad mecánica en pu")
ylabel("Par inducido [Nm] y Corriente [A]")

```

Codigo 6. Comportamiento característico de la corriente en función del tiempo.

```

clc
clear
// Datos del circuito equivalente
R1=0.2317; // Resistencia en el estator
X1=0.5409; // Reactancia en el estator
XM=19.943; // Impedancia de magnetización
R2=0.217; // Resistencia en el rotor
X2=0.5409; // Reactancia en el rotor

// Datos de placa
Vl= 460; // Voltaje de línea

```

```

fr=60; // Frecuencia eléctrica

P=4; // Numero de polos

nrot=1760 // Velocidad mecánica en rpm

Pm=20; // potencia mecánica hp

ef=0.89 // eficiencia

pf=0.88 // factor de potencia

Php = 25 // hp conexión en y

J=0.16 // kg*m^2 momento de inercia

// Cálculos según datos de placa

Vf= Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase

nsinc=120*fr/P // velocidad síncrona en rpm

ndes=nsinc-nrot; // velocidad de deslizamiento

des=ndes/nsinc // Deslizamiento

// Cálculos según circuito equivalente

Vth=Vf*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin

Zth=(XM*%i*(R1+X1*%i))/(R1+(X1+XM)*%i)// Impedancia de Thevenin

Wsinc=nsinc*2*%pi/(60)// Velocidad en radianes

Ztot=(XM*%i*(X2*%i+R2/des)+(R1+X1*%i)*(R2/des+%i*(X2+XM)))/(R2/des+%i*(X2+XM))//Impedancia total del
circuito

I=Vf/Ztot //Amplitud de corriente en estado estable

Mn=(3*Vth^2*R2/(des))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(des))^2+(imag(Zth)+X2)^2))//Momento motor

nmaxpu=1-des//Maxima velocidad en pu

TJN=J*(Wsinc/Mn)//Constante de tiempo del sistema

//Calculo de vector de corriente y grafica de corriente VS Desplazamiento o velocidad

//Definición de función

function y=f(x)

    y=TJN*Mn/((3*Vth^2*R2/(1-x))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-x))^2+(imag(Zth)+X2)^2)))

endfunction

```

```

k=1
for nk=0:0.0001:nmaxpu
    Ik(k)=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nk))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nk)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nk)+%i*(X2+XM)))
    k=k+1
end

//tensiones variables
Vini=200/sqrt(3)//Tensión de inicio
Vfin=460/sqrt(3)//Tensión de régimen
Vi=Vini:((Vfin-Vini)/(length(Ik)-1)):Vfin;//Vector de conjunto de tensiones

//Vectores
Tiempo=0
k=1
i=1
for nR=0:0.0001:nmaxpu
    Vth1(i)=Vi(i)*(XM/sqrt(R1^2+(X1+XM)^2)) // Voltaje de Thevenin variable
    function z=f1(t)
        z=TJN*Mn/((3*Vth1(i)^2*R2/(1-t))/(Wsinc*((real(Zth)+R2/(1-t))^2+(imag(Zth)+X2)^2)))
    endfunction
    if nR<=nmaxpu
        IS(i)=Vi(i)/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(1-nR))+(R1+X1*%i)*(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-
nR)+%i*(X2+XM)))
        nR1(i)=nR
        kR(i)=nR1(k)
        Tiempo=Tiempo+intg(kR(i),nR1(i),f1)
        Time1(i)=Tiempo
        IS1(i)=abs(IS(i))*sin(2*%pi*fr*Time1(i))
    end
    i=i+1
    k=i-1

```

```

end

for b=(max(Time1)+max(Time1)/length(Time1)):max(Time1)/length(Time1):1.5*max(Time1)
    l=length(Time1)+1
    IDest1=Vf/abs((XM*%i*(X2*%i+R2/(des))+(R1+X1*%i)*(R2/(des)+%i*(X2+XM)))/(R2/(1-nR)+%i*(X2+XM)))
    IS1(l)=(IDest1)*sin(2*%pi*fr*b)
    Time1(l)=b
end

//Graficas
plot2d(Time1,[IS1],[5],leg='I En función del tiempo')
title("Corriente vs Tiempo")
xlabel("Tiempo en segundos")
ylabel("Corriente [A]")

```

Arranque a través de variador de velocidad.

Código 7. Comportamiento característico de par y corriente en función de la velocidad.

```

clc
clear

// Datos del circuito equivalente
R1=0.2317; X1=0.5409; // Impedancia en el estator
R2=0.217; X2=0.5409; // Impedancia del rotor reflejada en el estator
XM=19.943; // Impedancia de magnetización

// Inductancias del circuito equivalente
L1=X1/(2*%pi*60) //inductancia del estator
LM=XM/(2*%pi*60) //inductancia de magnetización
L2=X2/(2*%pi*60) //inductancia del rotor

```

```

// Datos de placa
Vl= 460; // Voltaje de línea
f=60; // Frecuencia eléctrica
P=4; // Numero de polos
nrot=1760 // Velocidad mecánica en rpm
ef=0.89 // eficiencia
pf=0.88 // factor de potencia
Php = 25 // hp conexión en y
J=0.1 // kg*m^2 momento de inercia

nsinc1=120*f/P
T1=(25*746*60/(2*pi*nsinc1))
des2=(nsinc1-nrot)/nsinc1 // Deslizamiento

//dimensión de vectores
nmaxpu=1-(des2)
k=1
for nk=0:0.001:nmaxpu
    Dim(k)=k
    k=k+1
end

//relación f/V
cl=1
nR=0

//frecuencias variables
fini=3
ffin=100
nmaxpu1=120*ffin/(P*nsinc1)-(1-nrot/nsinc1)
for fre=fini:(ffin-fini)/(length(Dim)-1):ffin
    rel(cl)=fre/60

```

```

fr(cl)=fre
if fr(cl) < 60 then
    Vf(cl)= rel(cl)*Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase
else
    Vf(cl)= Vl/sqrt(3); // Voltaje de fase
end

nsinc(cl)=120*fr(cl)/P // velocidad síncrona en rpm
Wsinc(cl) = 2*pi*nsinc(cl)/60 // velocidad en radianes
ndes(cl)=nsinc1-nrot; // velocidad de deslizamiento
//Calculo de circuito equivalente
XM1(cl)=LM*2*pi*fr(cl)
X11(cl)=L1*2*pi*fr(cl)
X21(cl)=L2*2*pi*fr(cl)
Vth(cl)=Vf(cl)*XM1(cl)/sqrt(R1^2+(X11(cl)+XM1(cl))^2) // Voltaje de Thevenin
Zth(cl)=(XM1(cl)*%i*(R1+X11(cl)*%i))/(R1+(X11(cl)+XM1(cl))*%i) // Impedancia de Thevenin
if fr <= 60 then
    deff('T=h(des1)', T=(3*Vth(cl)^2*R2/des1)/(Wsinc(cl)*((real(Zth(cl))+R2/des1)^2+(imag(Zth(cl))+X21(cl))^2))-
T1')
    [des1,v,info]=fsolve(0.01,h)
    des(cl)=(des1)
    Tind(cl)=(3*Vth(cl)^2*R2/des(cl))/(Wsinc(cl)*((real(Zth(cl))+R2/des(cl))^2+(imag(Zth(cl))+X21(cl))^2))
else
    deff('T=g(des1)', T=(3*Vth(cl)^2*R2/des1)/(Wsinc(cl)*((real(Zth(cl))+R2/des1)^2+(imag(Zth(cl))+X21(cl))^2))-
(T1*f/fr(cl))')
    [des1,v,info]=fsolve(0.01,g)
    des(cl)=(des1)
    Tind(cl)=(f/fr(cl))*(3*Vth(cl)^2*R2/des(cl))/(Wsinc(cl)*((real(Zth(cl))+R2/des(cl))^2+(imag(Zth(cl))+X21(cl))^2))
end

Ztot(cl)=(XM1(cl)*%i*(X21(cl)*%i+R2/des(cl))+(R1+X11(cl)*%i)*(R2/des(cl)+%i*(X21(cl)+XM1(cl)))/(R2/des(cl)+%i*(
X21(cl)+XM1(cl)))

```

```

I(cl)=abs(Vf(cl)/Ztot(cl))
ang(cl)=atan(imag(conj(I(cl)))/real(I(cl)))
pf(cl)=cos(ang(cl))
nR1(cl)=nR
nR=nR+(nmaxpu1/(length(Dim)-1))

cl=cl+1
end

//Graficas
plot2d(nR1,[I, Tind],[5 3],leg='Corriente@Par inducido')
title("Par y Corriente vs Velocidad")
xlabel("Velocidad mecánica en pu")
ylabel("Par inducido [Nm] y Corriente [A]")

```

Codigo 8. Espectro de armónicos de salida del variador para sistemas con control SPWM

```

clear
clc

fc=1080//Frecuencia de señal portadora
fb=60//Frecuencia base (De señal moduladora)
A=1//amplitud de señal moduladora
Vtri=1//amplitud de la señal portadora
mf=fc/fb //Índice de modulación de frecuencia
ma=A/Vtri//Índice de modulación de amplitud

n=[1;mf-4;mf-2;mf;mf+2;mf+4;2*mf-5;2*mf-3;2*mf-1;2*mf+1;2*mf+3;2*mf+5;3*mf-6;3*mf-4;3*mf-
2;3*mf;3*mf+2;3*mf+4;3*mf+6;4*mf-7;4*mf-5;4*mf-3;4*mf-1;4*mf+1;4*mf+3;4*mf+5;4*mf+7]//orden de armónicos

for i=1:1:27

ord(i)=modulo(n(i),3)

if ord(i)==0 then

```

```

    nord(i)=0
else
    nord(i)=1
end
end
if ma==1 then
    Amp=[1;.018;.318;.601;.318;.018;.033;.212;.181;.181;.212;.033;.044;.157;.062;.113;.062;.157;.044;.050;.119;.009;.068
;068;.009;.119;.050]//amplitud de armónicos en pu
    elseif ma==0.8
        Amp=[.8;0;.220;.818;.220;0;.013;.139;.314;.314;.139;.013;.016;.104;.176;.171;.176;.104;.016;.017;.084;.115;.105;.105;
.115;.084;.017]//amplitud de armónicos en pu
    elseif
                                                                    ma==0.6
    Amp=[.6;0;.131;1.006;.131;0;0;.071;.370;.370;.071;0;0;.047;.203;.083;.203;.047;0;0;.034;.132;.008;.008;.132;.034;0]//am
plitud de armónicos en pu
    elseif ma==0.4
        Amp=[.4;0;.061;1.15;.061;0;0;.024;.326;.326;.024;0;0;.012;.139;.123;.139;.012;0;0;.07;.157;.157;.07;0;0]//amplitud
de armonicos en pu
    else
        disp("Valor de ma no predeterminado")
    end
    for j=1:1:27
        Amp(j)=nord(j)*Amp(j)
    end
    bar(n,Amp)//Espectro de armónicos
    HVF2=0
    for k=1:1:27
        if n(k)>=5 then
            HVF1=((Amp(k))^2)/n(k)
            HVF2=HVF2+HVF1
        end
    end
end

```

$HVF = \sqrt{\text{HVF}^2} // \text{Factor de tensión armónica}$

Codigo 9. Curva de factor de tensión armónica en función de la frecuencia de la señal portadora.

```

clear
clc
a=1
for fc=1000:1:10000
fb=60//Frecuencia base (De señal moduladora)
A=1//amplitud de señal moduladora
Vtri=1//amplitud de la señal portadora
mf=fc/fb //Índice de modulación de frecuencia
ma=A/Vtri//Índice de modulación de amplitud
if modulo(mf,3)==0 then
    fcrr(a)=fc
    n=[1;mf-4;mf-2;mf;mf+2;mf+4;2*mf-5;2*mf-3;2*mf-1;2*mf+1;2*mf+3;2*mf+5;3*mf-6;3*mf-4;3*mf-
2;3*mf;3*mf+2;3*mf+4;3*mf+6;4*mf-7;4*mf-5;4*mf-3;4*mf-1;4*mf+1;4*mf+3;4*mf+5;4*mf+7]//orden de armónicos
    for i=1:1:27
        ord(i)=modulo(n(i),3)
        if ord(i)==0 then
            nord(i)=0
        else
            nord(i)=1
        end
    end
    if ma==1 then
        Amp=[1;.018;.318;.601;.318;.018;.033;.212;.181;.181;.212;.033;.044;.157;.062;.113;.062;.157;.044;.050;.119;.009
;.068;.068;.009;.119;.050]//amplitud de armónicos en pu
    elseif ma==0.8

```

```

    Amp=[.8;0;.220;.818;.220;0;.013;.139;.314;.314;.139;.013;.016;.104;.176;.171;.176;.104;.016;.017;.084;.115;.105;.
    105;.115;.084;.017]//amplitud de armónicos en pu
elseif ma==0.6
    Amp=[.6;0;.131;1.006;.131;0;0;.071;.370;.370;.071;0;0;.047;.203;.083;.203;.047;0;0;.034;.132;.008;.008;.132;.034
;0]//amplitud de armónicos en pu
elseif ma==0.4
    Amp=[.4;0;.061;1.15;.061;0;0;.024;.326;.326;.024;0;0;.012;.139;.123;.139;.012;0;0;.07;.157;.157;.07;0;0]//ampl
itud de armónicos en pu
else
    disp("Valor de ma no predeterminado")
end
for j=1:1:27
    Amp(j)=nord(j)*Amp(j)
end
HVF2=0
for k=1:1:27
    if n(k)>=5 then
        HVF1=((Amp(k))^2)/n(k)
        HVF2=HVF2+HVF1
    end
end
HVF(a)=sqrt(HVF2)
a=1+a
end
end
plot2d(fcrr,HVF,[5],leg='HVF vs fc ')
title("Factor de tensión armónica vs frecuencia de señal portadora")
xlabel("Frecuencia de señal portadora (fc) [HZ]")
ylabel("Factor de tensión armónica (HVF) [pu]")

```

Curvas características de un relé térmico

Codigo 10. Curvas de respuestas del relé para diferentes corrientes de precargas.

```

i=1
tm=1800//Constante de tiempo térmica en segundos
A=1.2//Coeficiente
Ipc1=0.5//Corriente de precarga 1
Ipc2=0.8//Corriente de precarga 2
Ipc3=1//Corriente de precarga 3
for I=1.1:0.1:10
ta1(i)=tm*((A-Ipc1^2)/(I^2-Ipc1^2))//Tiempo admisible 1
ta2(i)=tm*((A-Ipc2^2)/(I^2-Ipc2^2))//Tiempo admisible 2
ta3(i)=tm*((A-Ipc3^2)/(I^2-Ipc3^2))//Tiempo admisible 3
I1(i)=I//Corriente de sobrecarga en pu
plot2d(I1,[ta1,ta2,ta3],[2,4,5],leg='Ipc=0,5@Ipc=0,8@Ipc=1',rect=[0 0 7 1800])
title("Corriente vs tiempo admisible")
xlabel("Corriente [pu]")
ylabel("Tiempo [S]")
i=i+1
end

```