



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

T E S I S

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS SISTEMAS DE ARRANQUE DIRECTO DE UN
MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO CON ROTOR JAULA DE ARDILLA**

Código CTI: 0303 0007: Uso eficiente de la energía en el sector
industrial y residencial - comercial

Código UNESCO: 3306.03: Motores Eléctricos

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Presentado por:

PASTRANA SALAZAR; Kely Abisai

Huancayo – Setiembre

2 0 2 3



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Av. MARISCAL CASTILLA N° 3909 – 4089 – El Tambo Huancayo

Pab. "C" – Ciudad Universitaria

Teléfono (☎): 064-481060 anexos 7213, 7204 (064-481181), 7203 y 7206

Web.: <https://fieeeunpc.edu.pe>

E-mail: electronica@unpc.edu.pe



"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho".

ACTA DE SUSTENTACIÓN

022-2024T

En el auditorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Centro del Perú, a los diez (10) días del mes de julio del año dos mil veinticuatro, con presencia de miembros del jurado integrado por:

PRESIDENTE : Dr. PEDRO NICOLÁS TORRES MAYTA

SECRETARIO : M. Sc. ADOLFO JAIME RIOS VELASCO

VOCALES : Dr. BARTOLOMÉ SÁENZ LOAYZA

: Mg. WILAR TITO ORELLANA MENDOZA

: M. Sc. MÁXIMO RIBARDO DE LA CRUZ MONTES

Siendo las 12:00 horas se dio inicio al acto de Sustentación de la tesis del bachiller KELY ABISAI PASTRANA SALAZAR, el Secretario Docente dio lectura a la **RESOLUCIÓN N° 060-2024-D-FIEE/UNCP**; terminada la lectura el sustentante procedió a la exposición de su Tesis titulada **"ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS SISTEMAS DE ARRANQUE DIRECTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO CON ROTOR JAULA DE ARDILLA"**; concluida la exposición; los señores miembros del Jurado procedieron a efectuar las observaciones del caso y las preguntas respectivas. Luego pasaron a la calificación según el Artículo N° 204 y N° 205 del Reglamento Académico General de la UNCP, finalmente se realizó el promedio de los calificativos emitidos por los miembros del jurado, la calificación cuantitativa fue de 21,67; obteniéndose el siguiente resultado:

APROBADO POR UNANIMIDAD

El Señor presidente da a conocer al sustentante el resultado final, **quien lo felicitó**.

Se da por concluida la sustentación a las 13 : 20 horas. En señal de conformidad firman los miembros del jurado calificador.



Dr. PEDRO NICOLÁS TORRES MAYTA
PRESIDENTE



M. Sc. ADOLFO JAIME RIOS VELASCO
SECRETARIO



Dr. BARTOLOMÉ SÁENZ LOAYZA
VOCAL



Mg. WILAR TITO ORELLANA MENDOZA
VOCAL



M. Sc. MÁXIMO RIBARDO DE LA CRUZ MONTES
VOCAL



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Av. MARISCAL CASTILLA N° 3909 – 4089 – El Tambo Huancayo

Pab. "C" – Ciudad Universitaria

Teléfono (☎): 064-481060 anexos 7213,7204 (064-481181),7203 y 7206

Web.: <https://fieceuncp.edu.pe>

E-mail: electronica@uncp.edu.pe



Huancayo, 27 de octubre de 2023.

Señor:

Dr. BARTOLOMÉ SÁENZ LOAYZA

Decano de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

ASUNTO : INFORME DE CULMINACIÓN DE ASESORAMIENTO DE TESIS.

INTERESADO : PASTRANA SALAZAR, Kely Abisai

De mi mayor consideración:

Me es grato dirigirme a usted con la finalidad de saludarlo y a su vez informar que habiendo revisado el borrador de tesis **concluido** y comprobado la no duplicidad mediante Turnitin de acuerdo a la normativa de la UNCP cumple al tener solo 22% el borrador de tesis titulado **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS SISTEMAS DE ARRANQUE DIRECTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO CON ROTOR JAULA DE ARDILLA”** presentado por el Bachiller **PASTRANA SALAZAR; Kely Abisai**, al cual doy mi **CONFORMIDAD Y APROBACIÓN** por cumplir con el Reglamento Académico General de la Universidad Nacional del Centro del Perú y para que continúe con los trámites respectivos.

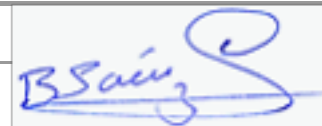
Aprovecho la oportunidad para reiterarle las muestras de mi mayor estima personal.

Atentamente

Dr. Bartolomé Sáenz Loayza
DOCENTE ASESOR

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS SISTEMAS DE ARRANQUE DIRECTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO CON ROTOR JAULA DE ARDILLA"

INFORME DE ORIGINALIDAD



22%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

[idoc.pub](#)

Fuente de Internet

5%

2

[www.itztli.es](#)

Fuente de Internet

4%

3

[docplayer.es](#)

Fuente de Internet

2%

4

[www2.dee.cefetmg.br](#)

Fuente de Internet

2%

5

[pt.scribd.com](#)

Fuente de Internet

1%

6

[ribuni.uni.edu.ni](#)

Fuente de Internet

1%

7

[repositorio.unsa.edu.pe](#)

Fuente de Internet

1%

8

[www.weg.net](#)

Fuente de Internet

1%

9

biblioteca.usac.edu.gt

Fuente de Internet



<1 %

10

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

11

www.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

12

mafiadoc.com

Fuente de Internet

<1 %

13

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

14

www.danfoss.de

Fuente de Internet

<1 %

15

aprenderly.com

Fuente de Internet

<1 %

16

www.danfoss-sc.de

Fuente de Internet

<1 %

17

hdl.handle.net

Fuente de Internet

<1 %

18

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1 %

19

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

20

repositoriodemo.continental.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 15 words

Excluir bibliografía

Activo

A S E S O R

Dr. Bartolomé Sáenz Loayza

AGRADECIMIENTOS

A los Catedráticos de la FIEE – UNCP, por su comprensión y Haberme Guiado en el conocimiento de la ingeniería Eléctrica

DEDICATORIA
A MIS PADRES Y HERMANOS POR SUS CONSEJOS, Y SU APOYO
DESINTERESADO

RESUMEN

En las más diversas ramas del sector industrial se necesitan diferentes tipos de accionamientos para arrancar y parar máquinas eléctricas. La carga mecánica requiere un par mecánico dado a una velocidad dada que puede variar con el tiempo sin causar "molestias" mecánicas. Asimismo, el motor eléctrico debe responder al comportamiento de la carga, provocando el menor "trastorno" posible al sistema eléctrico al que está conectado, con la preocupación de reducir las pérdidas para aumentar la eficiencia del conjunto. La elección del motor y sus dispositivos de arranque y parada, incluso influenciada por aspectos ambientales, está directamente relacionada con la carga mecánica a activar y su impacto en el sistema. El arranque directo es el método de arranque de motores de corriente alterna, en el que el motor está conectado directamente a la red eléctrica. Es decir, se produce cuando aplicamos la tensión nominal directamente a los devanados del estator del motor. Al elegir entre un arrancador suave y un convertidor de frecuencia, la primera pregunta es ¿cuál usar? el objetivo de esta tesis es mostrar las similitudes y diferencias entre los arrancadores suaves y los convertidores de frecuencia. Al comparar los dos tipos de dispositivos, es posible identificar el que mejor se adapta a sus necesidades. La mayoría de las evaluaciones comparativas se realizan entre arrancadores suaves inteligentes y convertidores de frecuencia (VFD). La pregunta es muy simple, pero la respuesta no es así, pero puede surgir examinando las funciones y propósitos de los arrancadores suaves y convertidores de frecuencia. Por lo general, la mejor opción depende del tipo de aplicación. Esta tesis explica algunas de las diferencias clave y ayudará a elegir un tipo de controlador en lugar de otro.

SUMMARY

In the most diverse branches of the industrial sector, different types of drives are needed to start and stop electrical machines. Mechanical loading requires a given mechanical torque at a given speed that can vary over time without causing mechanical "discomfort". Likewise, the electric motor must respond to the behavior of the load, causing the least possible "disruption" to the electrical system to which it is connected, with the concern of reducing losses to increase the efficiency of the whole. The choice of the motor and its starting and stopping devices, even influenced by environmental aspects, is directly related to the mechanical load to be activated and its impact on the system. Direct starting is the method of starting alternating current motors, in which the motor is directly connected to the mains. That is, it occurs when we apply the rated voltage directly to the motor stator windings. When choosing between a soft starter and a drive, the first question is which one to use? The objective of this thesis is to show the similarities and differences between soft starters and frequency converters.

By comparing the two types of devices, it is possible to identify the one that best suits your needs. Most benchmarking is done between smart soft starters and variable frequency drives (VFDs). The question is very simple, but the answer is not, but it can arise by examining the functions and purposes of soft starters and frequency converters. Generally, the best option depends on the type of application. This thesis explains some of the key differences and will help you choose one driver type over another.

INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos están presentes en la activación de máquinas y equipos mecánicos utilizados en el sector industrial, e incluso en los sectores de servicios y residencial. En el sector industrial, los motores representan el 75% de la energía eléctrica consumida, ocupando los motores eléctricos de inducción trifásicos (motores asíncronos) alrededor del 90% de este consumo.

El funcionamiento de un motor eléctrico requiere el uso de equipos diseñados no sólo para protegerlo contra corrientes de sobrecarga y cortocircuitos, sino también para controlar su arranque y parada, inversión de rotación y, más modernamente, el arranque “suave” del motor. y la máquina accionada, con el uso de modernos equipos de electrónica de potencia. El conjunto de equipos que realizan estas funciones, para un motor eléctrico dado, constituye los denominados “conjuntos de arranque”. Entre las diversas posibilidades de arranques suaves, dos equipos destacan enormemente. Estos son convertidores de frecuencia y arrancadores suaves estáticos. Y saber dimensionar correctamente qué equipo es el ideal para cada situación, ya que ambos tienen aplicaciones similares, es una tarea llena de matices que, de vez en cuando, genera dudas incluso en los ingenieros de diseño más experimentados.

INDICE

RESUMEN	VI
SUMMARY	VII
INTRODUCCIÓN	VIII

ÍNDICE

CAPITULO I.....	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.3.1 PROBLEMA GENERAL	12
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	12
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	12
1.5. JUSTIFICACIÓN	12
1.6. DELIMITACIÓN DE LA TESIS.....	12
CAPITULO II	13
ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	13
2.1. ANTECEDENTES	13
2.1.1 ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL	13
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES	18
2.2 MARCO TEÓRICO	20
2.2.1 DEFINICIONES	20
2.2.2 Accionamientos eléctricos	23
2.3 Arranque suave (Soft-Starter)	28
2.3.1 Principios de funcionamiento de un soft-starter	29
2.3.2. Circuito control de un soft-starter	32
2.3.3. Activación de un soft-stater	33
2.3.4 Funciones parametrizables de un soft-starter	37
2.3.5 Solicitud en ahorro de energía	41
2.4 Convertidores de frecuencia.....	41
2.4.1. Bloques componentes de un convertidor de frecuencia	42
2.4.2. Diagrama de bloques de un convertidor de frecuencia	43
2.4.3 operación de un convertidor de frecuencia	44

2.4.4. Modulación de ancho de pulso (PWM)	45
2.4.5. Clasificación de convertidores de frecuencia	47
2.4.6. Control escalar (voltios/Hz)	47
2.4.6.1. Características de control escalar	48
2.4.7. Control vectorial	49
2.4.7.1. Curvas par x velocidad y corriente x velocidad	51
2.4.8. Análisis comparativo: control escalar Control vectorial	52
2.5. Funciones parametrizables de un convertidor de frecuencia.....	53
2.5.1 tipos de frenado de un variador de frecuencia.....	55
2.5.2 Solicitud en control de procesos	57
2.5.3 Solicitud en ahorro de energía.....	58
2.6 Hipótesis general	59
2.7 Variables	59
CAPITULO III	61
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
3.1 Tipos de estudio y método de investigación	61
3.1.1. Método hipotético deductivo	61
3.2 Tipo de investigación	61
3.3. Población y muestra	61
3.3.1 Población	61
3.3.2. Muestra	61
3.4. Método de recolección de datos	62
3.5. Instrumentos de recopilación de datos	62
3.6. Procesamiento de datos.....	62
CAPÍTULO IV	63
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	63
4.1 Comparación entre aplicaciones de convertidores de frecuencia y arrancadores estáticos (soft-starter).....	63
4.2. Cargas típicas impulsadas por convertidores de frecuencia y arrancadores suaves.....	63
4.3 Cotización.....	65
4.4. Discusión de los resultados	69
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73
A N E X O S.....	74

Índice de Figuras

- Figura 2.1 Arrancador con resistencia de estator
- Figura 2.2 Arrancador estrella triángulo
- Figura 2.3 Arrancador por autotransformador
- Figura 2.4 arrancador de arranque suave
- Figura 2.5 diagrama de bloques de VFD
- Figura 2.6 Diagrama de cableado para arrancar un motor asíncrono con un arrancador suave
- Figura 2.7 Motor de inducción trifásico
- Figura 2.8 Arranque directo de un motor de inducción trifásico
- Figura 2.9 Arranque estrella-triángulo de un motor de inducción trifásico
- Figura 2.10 Arranque compensador (autotransformador) de un motor de inducción trifásico
- Figura 2.11 Arranque serie-paralelo de un motor de inducción Trifásico
- Figura 2.12 Forma de onda de arranque de un arrancador suave
- Figura 2.13 Motor trifásico con una fase controlada en el arranque
- Figura 2.14 Motor trifásico con dos fases controlada en el arranque
- Figura 2.15 Motor trifásico con una fase controlada en el arranque
- Figura 2.16 Curva par x corriente. Comparación entre arrancador Directo y arrancador suave
- Figura 2.17 Arranque suave con el arrancador Soft-starter en línea con el motor
- Figura 2.18 Arranque suave con el soft-starter insertado en el “ Δ ” del motor
- Figura 2.19 Rampa de aceleración del arrancador soft-stater
- Figura 2.20 Rampa de desaceleración del arrancador suave
- Figura 2.21 Pulso de tensión en el arranque del arrancador suave
- Figura 2.22 Bloques de componentes de un convertidor de frecuencia
- Figura 2.23 Diagrama de bloques de un convertidor de frecuencia
- Figura 2.24 Construcción electrónica de un convertidor de frecuencia
- Figura 2.25 Modulación de Ancho de Pulso
- Figura 2.26 Curvas características corriente x velocidad y par x velocidad

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

Este trabajo se caracteriza por presentar un estudio comparativo sobre la aplicación de convertidores de frecuencia y arrancadores estáticos soft-starter para un “arranque suave” de motores eléctricos de inducción jaula de ardilla trifásicos.

Inicialmente repasaremos todos los conceptos de accionamiento de motores eléctricos, y luego nos ocuparemos específicamente de los equipos antes mencionados. Hablaremos de sus principales características técnicas y aplicabilidad, además de tratar de dilucidar (a través de casos prácticos) cuán “costosa” para un proyecto puede resultar una aplicación inadecuada de cada uno de estos equipos.

1.2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para llevar a cabo este arranque suave destacan enormemente dos equipos: los variadores de frecuencia y los arrancadores estáticos soft-starter. Tales equipos tienen efectos muy beneficiosos en las aplicaciones para las que están destinados. Las bajas velocidades significan menos ciclos para cojinetes, ventiladores y otros elementos giratorios (por lo tanto, fatiga minimizada). El “arranque suave” de un motor elimina los elevados esfuerzos que provoca el arranque directo sobre los devanados del estator y las barras del rotor, influyendo positivamente en su vida útil, cuando se aplica correctamente. Aunque es bien sabido que los convertidores de frecuencia tienen una mayor aplicabilidad en comparación con los arrancadores suaves, en algunos casos estos últimos son una opción económicamente más viable que los primeros. Sin embargo, hay algunos factores relevantes que deben tenerse en cuenta cuando se utilizan motores accionados, aunque estos son factores bien definidos y manejables. especificación técnica.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cómo determinar las ventajas y desventajas de dos sistemas de arranque directo para un motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla?

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las ventajas y desventajas de dos sistemas de arranque directo para un motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla.

1.5. JUSTIFICACIÓN

Práctica. – El tema de investigación que se plantea es parte de la ingeniería eléctrica y pertenece al área de las máquinas eléctricas; es un tema de evaluación práctica y cuyo resultado permitirá conocer las ventajas y desventajas de los dos tipos de arranque indicados.

Social. – El análisis es planteado en la necesidad de mejorar la calidad de servicio a los usuarios debido a que no se tienen analizados los resultados de las formas de arranque desde el punto de vista técnico.

1.6. DELIMITACIÓN DE LA TESIS

En la tesis no se diseña, Se analizará en cuanto a su funcionalidad y estructuras de dos sistemas de arranque directo para un **motor eléctrico de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla.**

CAPITULO II

ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1 ANTECEDENTES A NIVEL INTERNACIONAL

(Sacchi & Ricaldi, 1997) **en su artículo científico "Cálculo y diseño de máquinas eléctricas." Afirma:**

“Un motor de inducción trifásico es un tipo de motor de CA “asíncrono. Es el motor eléctrico más utilizado en la industria para impulsar cargas mecánicas. Cuando se arranca el motor de inducción, consume una gran corriente de arranque conocida como corriente de arranque del motor”.

“La alta corriente de arranque causa muchos problemas en el sistema de suministro, como la caída de voltaje de la línea, etc. La caída de voltaje del sistema afecta el funcionamiento de otros aparatos eléctricos conectados a la misma línea. Por lo tanto, necesitamos adaptar algunos métodos para arrancar los motores de inducción para reducir la corriente de arranque del motor a su rango de corriente permisible. Hay dos tipos de motores de inducción trifásicos”.

(Handbook, 2010) **En su artículo: Topologías y uso, Sobre el arrancador con resistencia del estator se indica que:** “El método de arranque por resistencia del estator es un tipo de arranque de voltaje reducido. Cuando arrancamos un motor de inducción, el rotor consume una gran corriente porque el deslizamiento es igual a la unidad al principio. La corriente del motor disminuye a medida que el motor acelera y alcanza la velocidad máxima. Si sumamos resistencia en serie con la resistencia del estator, la resistencia total impide la corriente y por lo tanto se reduce la corriente de arranque del motor”.

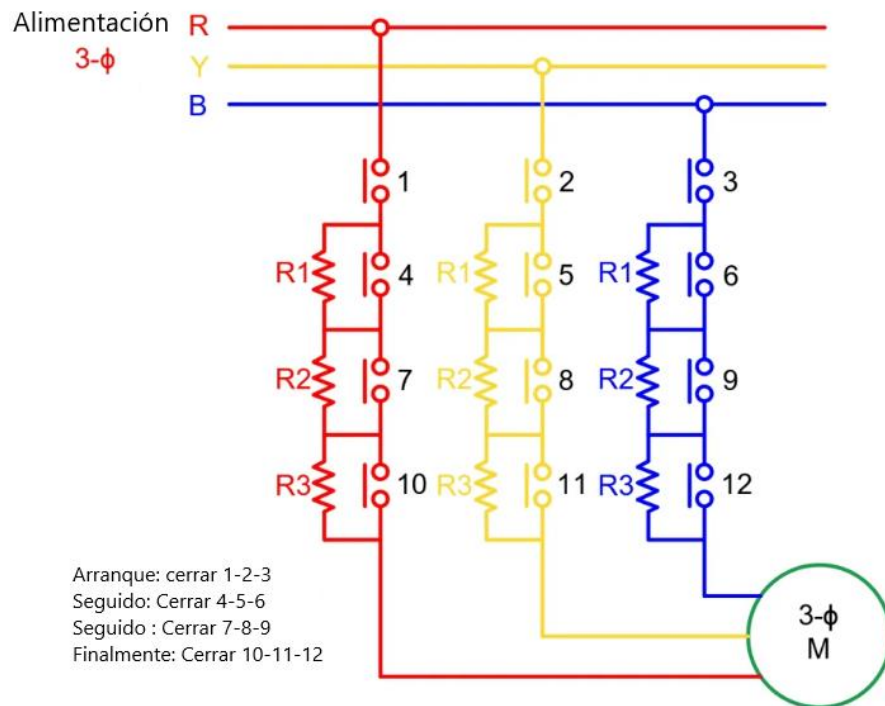


Figura 2.1 Arrancador con resistencia de estator

En esta forma de arranque se realiza una conexión de una resistencia externa en serie con cada fase del devanado del estator. La caída de tensión tiene lugar en la resistencia externa y, por tanto, se reduce la tensión entre los terminales del motor. El voltaje de estator reducido conduce a menos corriente de estator. Ahora, la resistencia del estator se elimina en pasos del circuito del estator con la aceleración del motor. Cuando el motor alcanza la velocidad máxima, las resistencias externas se cortan por completo y el estator recibe el voltaje nominal completo a través de las terminales del motor. Las siguientes son las desventajas de este método.

- La pérdida de potencia en las resistencias externas se produce en forma de calor.
- El voltaje reducido provoca una aceleración lenta del motor.

(Jordan, 1994) **in your paper “Energy-Efficient Motors and their Applications” respecto al arrancador estrella-triángulo indica que:**

“El método de arranque estrella-triángulo es un tipo de arranque de voltaje reducido. El arrancador estrella-triángulo es el método más utilizado para arrancar motores de inducción. Este método se utiliza para los motores que están diseñados para operar en estatores conectados en delta”. El diagrama de circuito del arrancador estrella-triángulo se muestra en la figura 2.2.

En este método, el devanado del estator del motor está conectado en estrella durante el período de arranque, y está conectado en delta durante la condición de funcionamiento normal.

Cuando el motor arranca en conexión en estrella, la tensión de alimentación se convierte en el 57,7 % de la tensión normal y, por lo tanto, se reduce la corriente de arranque del motor. Una vez que el motor alcanza aproximadamente el 80% de su velocidad normal, se cambia a una conexión delta.

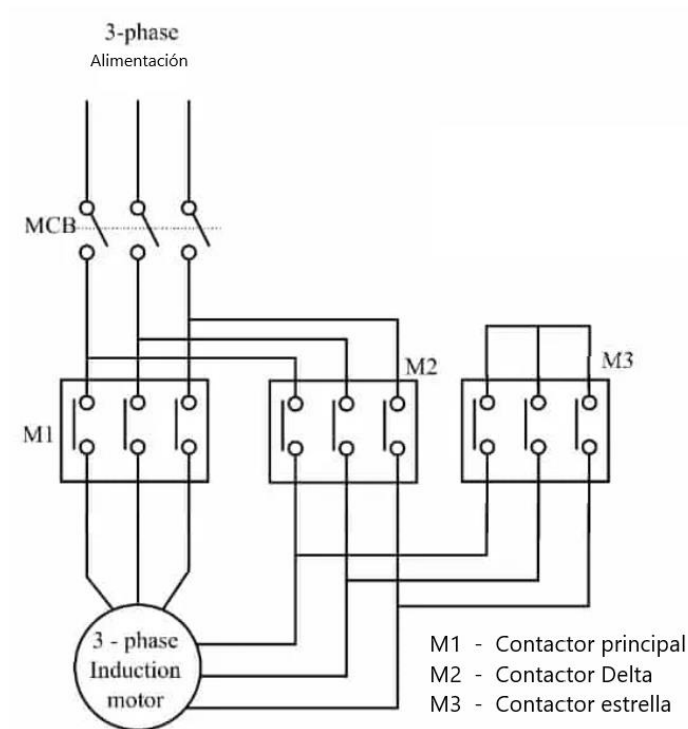


Figura 2.2 Arrancador estrella triángulo

Se utiliza un interruptor de doble paso (actualmente contratistas) para cambiar la conexión de estrella a triángulo.

En funcionamiento en estrella, la capacidad de entrega de par es un tercio de la capacidad de par total del motor.

“(Y.V., 2007)” Russian Electrical Engineering, Comenta sobre el: Arrancador de autotransformador

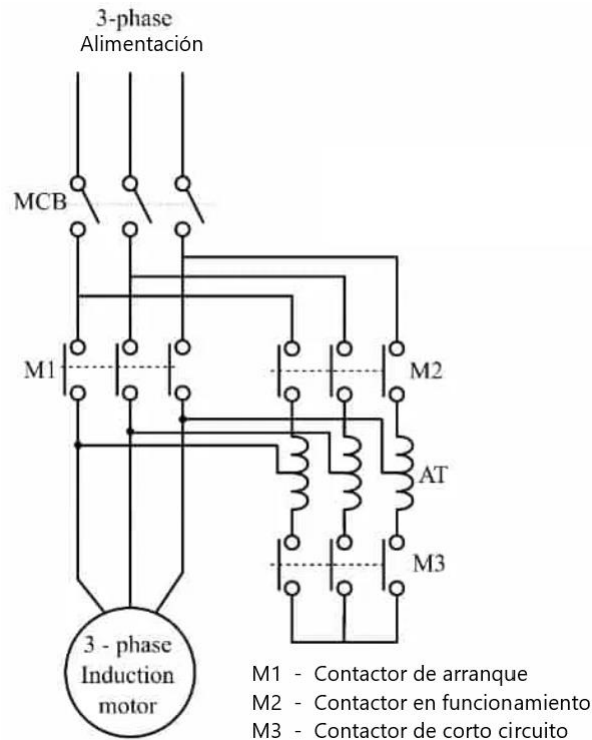


Figura 2.3 Arrancador por autotransformador

También es un tipo de arranque de voltaje reducido. El método de arranque del motor de inducción trifásico que utiliza un autotransformador para reducir la corriente de arranque del motor se denomina arranque con autotransformador. El arrancador de autotransformador se puede utilizar igualmente para arrancar motores de inducción trifásicos conectados en triángulo y en estrella. El diagrama de circuito del arrancador de autotransformador se muestra en la figura 2.3.

Aquí, el autotransformador utilizado es un transformador reductor trifásico que tiene diferentes derivaciones para obtener diferentes voltajes. El arrancador de autotransformador generalmente tiene tres pasos de voltaje, 50%, 65% y 80%. Cuantos más pasos de voltaje sean posibles para obtener una aceleración suave del motor. El motor arranca con una toma de menor voltaje y la toma se cambia a tomas más altas con la aceleración del motor.

En este método, al arrancar, se aplica una tensión de alimentación reducida al motor a través del autotransformador. Una vez que el motor alcanza una velocidad de aproximadamente el 80 % de la velocidad nominal, el contactor de cortocircuito retira automáticamente el autotransformador del circuito y el motor funciona con el voltaje

de alimentación total. Tiene todas las características de protección del motor, como protección contra sobrecarga y sin voltaje.

Aquí, se debe tener en cuenta que el par de arranque del motor es proporcional al cuadrado del voltaje. Por lo tanto, el par de arranque del motor se reduce a menor tensión y los arrancadores con autotransformador son adecuados para el arranque de la carga que exige un par de arranque bajo. El arrancador de autotransformador tiene las siguientes ventajas.

- Baja pérdida de potencia
- Baja corriente de arranque
- Adecuado para motores de hasta 25 hp, dependiendo de la potencia del sistema de alimentación

Arranque suave

El arrancador suave es un tipo de arrancador electrónico de voltaje de estator reducido. A continuación, se muestra el diagrama del circuito de alimentación del arrancador suave.

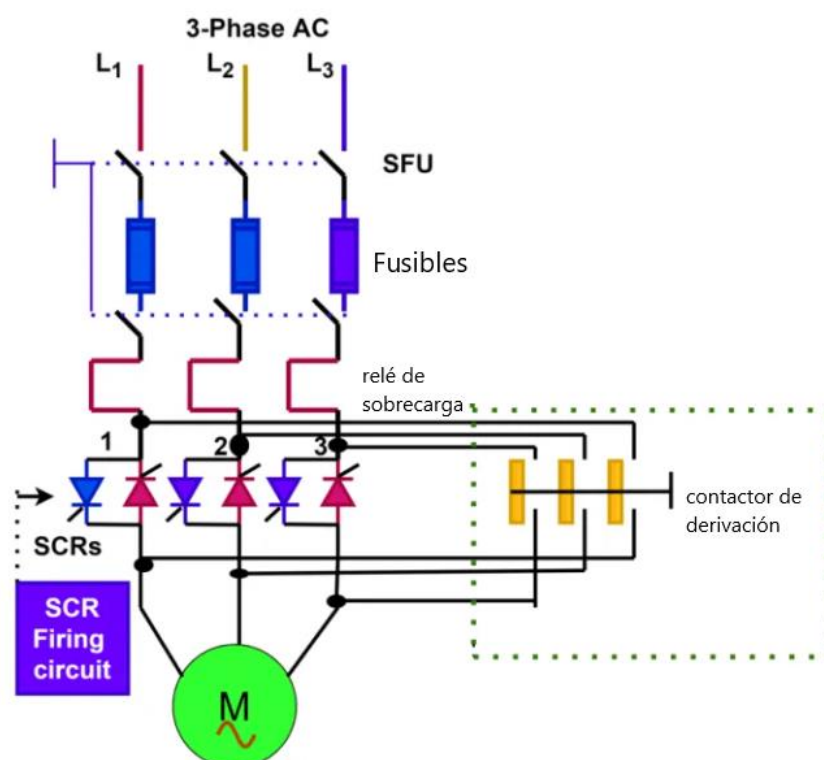


Figura 2.4 arrancador de arranque suave

Reduce el voltaje cuando el motor arranca y aumenta el voltaje a medida que el motor acelera a su velocidad máxima. Así, mediante un arrancador suave, es posible regular

el voltaje desde cero hasta el voltaje de línea completo. El ángulo de disparo cambiante del tiristor gobierna el voltaje de salida alimentado al estator. El arrancador suave reduce las sacudidas en el motor y el equipo accionado durante el arranque y, por lo tanto, mejora la confiabilidad.

Unidad de frecuencia variable (VFD)

El diagrama de bloques de VFD se muestra a continuación.

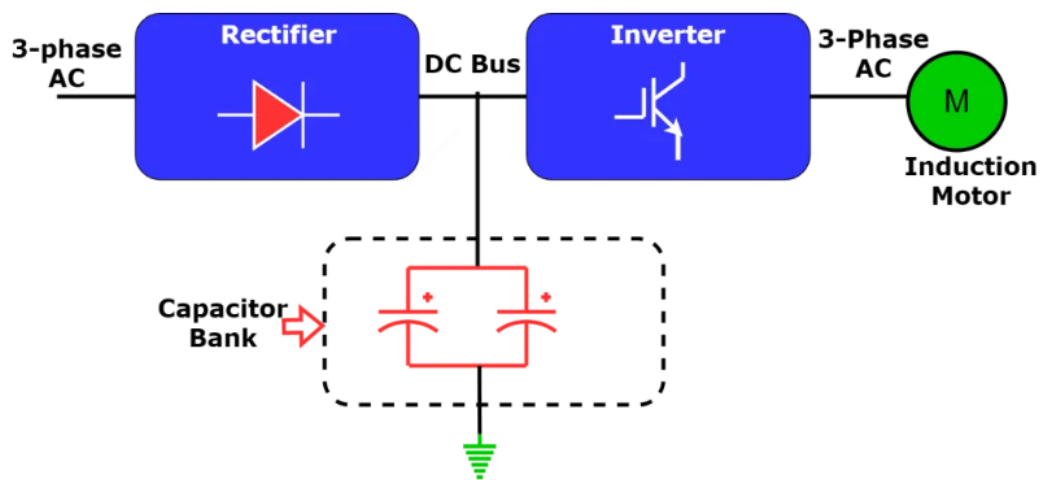


Figura 2.5 diagrama de bloques de VFD

El VFD se puede utilizar como arrancador de motor y también para controlar la velocidad de un motor de inducción. Un VFD es un arrancador suave avanzado que controla la velocidad del motor variando la frecuencia. El voltaje también varía en proporción a la variación de frecuencia por el inversor PWM para mantener el flujo constante en el motor.

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

“ (Mangonon, 2010)” **Comenta sobre: Los Motores asíncronos con un arrancador suave:**

Los fusibles pueden ser reemplazados por un interruptor que, sin embargo, no permite implementar correctamente la protección de los tiristores en caso de falla. Además, cuando el tipo de arrancador suave utilizado no prevea una protección térmica

internamente implementada, es necesario utilizar una protección térmica externa instalada aguas arriba del nodo de by_pass.

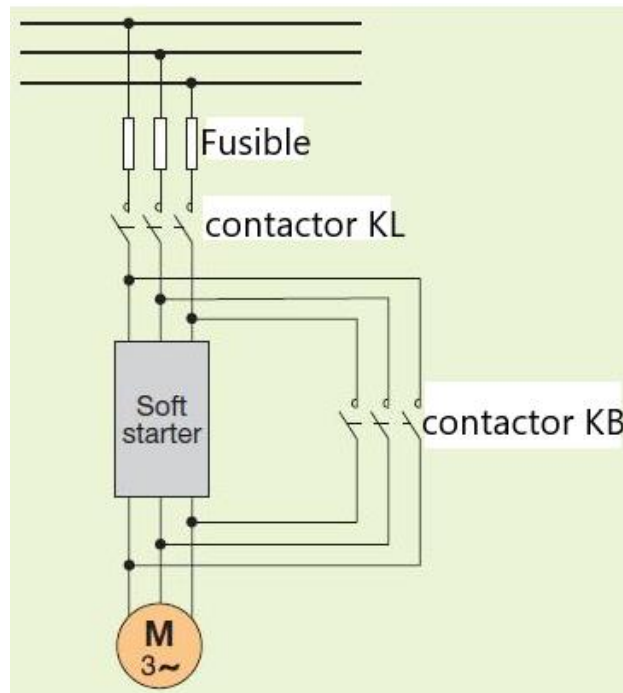


Figura 2.6 Diagrama de cableado para arrancar un motor asincrónico con un arrancador suave

Normalmente, la fase de arranque tiene lugar con KL cerrado y KB abierto para que el arrancador suave pueda controlar el arranque; posteriormente, KB cierra con la exclusión de la parte de potencia dentro del arrancador suave, dejando activa la parte de control.

Un método moderno de arranque es usar arrancadores estáticos electrónicos comúnmente llamados arrancadores suaves. El uso de estos dispositivos permite reducir la corriente de arranque, determinar el par y establecer el tiempo de arranque. Todo esto permite alimentar el motor de forma muy gradual, que se incrementa durante todo el procedimiento, para obtener un arranque lineal, evitando esfuerzos eléctricos o esfuerzos en las partes mecánicas. El arrancador suave consta de una unidad de potencia y una unidad de mando y control. El esquema de conexión típicamente utilizado es el que se muestra a continuación y se define como "en línea".

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 DEFINICIONES

Por definición, los motores trifásicos de corriente alternan son convertidores de energía electromagnética que convierten la energía eléctrica en energía mecánica (funcionando como motor) y viceversa (funcionando como generador) mediante inducción electromagnética.

Un motor trifásico de inducción jaula de ardilla se caracteriza por tener un devanado primario (o estator) fijo, similar al de un motor síncrono, y un devanado secundario (o rotor) giratorio, constituido por barras de material conductor (cobre o aluminio) cortocircuitado en ambos extremos mediante anillos gruesos.

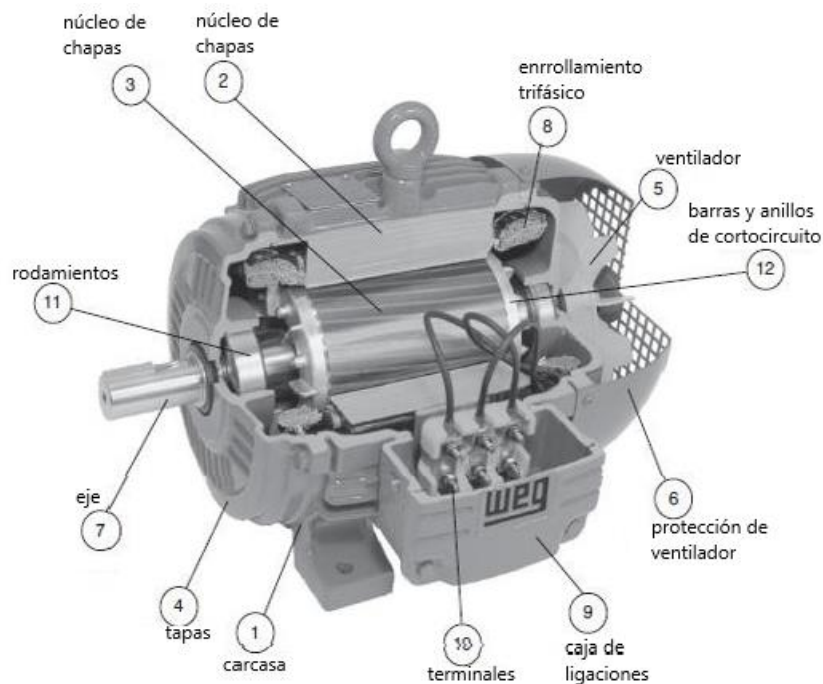


Figura 2.7. Motor de inducción trifásico

Cada una de las partes representa un “componente” electromecánico del sistema, cuyas funciones se definen a continuación:

- circuito magnético estático: tiene una construcción robusta en hierro fundido, acero aluminio inyectado, resistente a la corrosión y con aletas para enfriamiento;
- estator: láminas ferromagnéticas apiladas y aisladas entre sí;
- carcasa: soporte de montaje;
- bobinas: ubicadas en agujeros abiertos en el estator y alimentadas por la red;

- rotor: formado por un núcleo ferromagnético, también laminado, sobre el que existe un devanado o un conjunto de conductores paralelos, en los que se inducen corrientes provocadas por la corriente alterna de las bobinas del estator.
- La parte fija del motor es el estator. En la carcasa del motor existe un núcleo formado por finas láminas de hierro de unos 0,5 mm, con ranuras que albergan el devanado trifásico. Los devanados de fase y el núcleo del estator son los responsables de generar el campo magnético. La velocidad del motor está determinada por el número de pares de polos. Cuando el motor está funcionando a su frecuencia nominal, la velocidad del campo magnético se denomina velocidad síncrona del motor.

Otra característica constructiva que define los tipos de motores asíncronos trifásicos de inducción está relacionada con el tipo de rotor que los constituye. Pueden ser bobinados ó cortocircuitados.

rotor bobinado: generalmente elegido cuando la carga necesita un alto par de arranque; cuando el tiempo de aceleración es largo debido a la gran inercia de la carga (por ejemplo,

ventilador); o cuando la carga requiere arranques frecuentes, y/o sufre un avance lento e incluso atascos. Desde el punto de vista del precio, la fiabilidad y el mantenimiento, siempre se prefiere este en comparación con el rotor en cortocircuito.

Los rotores en cortocircuito (con barras en cortocircuito), también llamados de jaula de ardilla, son los más utilizados en la industria. Este tipo de rotor tiene barras de aluminio que pasan por las ranuras con un anillo de aluminio colocado en cada extremo del rotor para cortocircuitar las barras. Así, cuando una barra de rotor se coloca en un campo giratorio, un polo magnético pasa a través de la barra. El campo magnético polar induce una corriente (I_w) en el rotor que se ve afectada únicamente por la fuerza (F). La fuerza resultante es proporcional a la densidad de flujo (B), la corriente inducida (I_w), el tamaño del rotor (L) y el ángulo (θ) entre la fuerza y la densidad de flujo. De esta manera tenemos:

$$F = B \cdot L \cdot I_w \cdot \text{sen}(\theta) \quad (1)$$

El siguiente polo que pasará por el rotor tiene la polaridad invertida. Esto induce una corriente en la dirección opuesta, ya que la dirección del campo magnético también ha cambiado, la fuerza actúa en la misma dirección que antes.

OBS. Cuando todo el rotor se coloca en el campo giratorio, la velocidad del rotor no alcanzará la velocidad del campo giratorio, ya que a la misma velocidad no se induciría corriente en el rotor.

Funcionamiento del motor de inducción trifásico

Para una comprensión completa del funcionamiento del motor de inducción trifásico, es necesario revisar algunos conceptos físicos importantes con respecto a la teoría de la electricidad, específicamente las Leyes de Faraday y Lenz:

- **Ley de Faraday (inducción):** un conductor por el que circula una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor. La intensidad del campo magnético es proporcional a la corriente eléctrica que circula por el conductor y la dirección del campo magnético viene dada por la regla de la mano derecha (en la que el pulgar indica la dirección de la corriente eléctrica y los dedos el campo magnético).
- **Ley de Lenz:** la corriente inducida siempre se produce de forma que contrarresta la variación de la magnitud que la produce. Considerando una bobina, la acción de empujar el imán es la alteración que produce la corriente inducida, la cual actuará en el sentido de oponerse a la aproximación; si el imán se tira, la corriente inducida tenderá a oponerse a este movimiento, creando un polo sur para atraer el imán.¹ Aprovechando este repaso de conceptos, también vale la pena señalar la diferencia entre un generador eléctrico y un motor eléctrico:
- **generador eléctrico:** basado en la Ley de Faraday: si un conductor se mueve a través de un campo magnético (B), se induce un voltaje. Si el conductor es un circuito cerrado, fluirá una corriente (I). Cuando el conductor se mueve,

una fuerza (F), que es perpendicular al campo magnético, actuará sobre el conductor.

- **motor eléctrico:** el principio de inducción funciona a la inversa, es decir, el conductor que lleva una corriente se coloca dentro de un campo magnético. Luego, el conductor es influenciado por una fuerza (F) que lo saca del campo magnético.

2.2.2 Accionamientos eléctricos

Un accionamiento eléctrico es un sistema capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica, manteniendo este proceso de conversión bajo control. Usualmente se usa para accionar máquinas o equipos que requieren algún tipo de movimiento controlado, como la velocidad de rotación de una bomba.

Un accionamiento eléctrico moderno normalmente consta de: motor (convierte la energía eléctrica en energía mecánica); dispositivo electrónico (comanda y/o controla la energía eléctrica entregada al motor); transmisión mecánica (adapta velocidad e inercia entre motor y máquina).

Los motores más utilizados en accionamientos eléctricos son los motores de inducción monofásicos y trifásicos. Estos motores, cuando se alimentan con tensión y frecuencia constantes, siempre que no estén funcionando a plena carga (potencia de carga igual a la potencia nominal del motor) están desperdiciando energía.

También es importante señalar que un motor de inducción transforma aproximadamente el 85% de toda la energía eléctrica que recibe en energía mecánica y que el 15% restante se desperdicia, por lo que el accionamiento eléctrico de las máquinas es un tema de extraordinaria importancia en términos que se refiere al ahorro de energía.

2.2.2.1. Tipos de accionamientos para motores de inducción

Aclararemos en forma de temas los cuatro métodos de arranque más eficientes, así como discutiremos sus aplicaciones, ventajas y desventajas.

- **salida directa:** La forma más sencilla de arrancar un motor de inducción es el llamado arranque directo. Aquí, un motor se arranca directamente a través de un contactor, sin embargo, se debe tener en cuenta que existen restricciones de uso para este tipo de arranque. Como se ha visto anteriormente, la corriente de arranque de un motor de inducción cuando se conecta directamente a la tensión de red es siete veces mayor que la corriente nominal. Por ello, y fundamentalmente para motores grandes, no se utiliza el arranque directo.

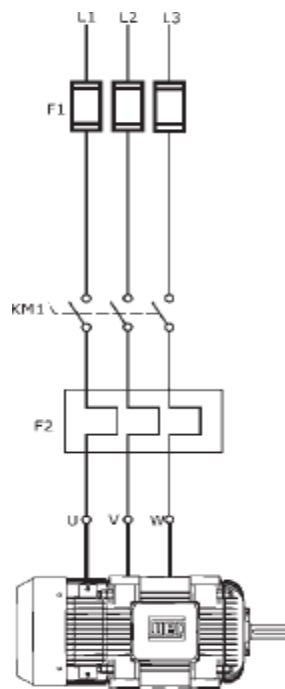


Figura 2.8 Arranque directo de un motor de inducción trifásico

Beneficios:

- el costo más bajo entre todos los arrancadores;
- implementación sencilla;
- alto par de arranque.

desventajas:

- alta corriente de irrupción, provocando una caída de tensión en la red de suministro. Como resultado, puede interferir con equipos en la misma instalación;
- es necesario sobredimensionar cables y contactores;
- limitación por número de maniobras/hora;
- picos de torsión.

coincidencia estrella-triángulo: este tipo de arrancador solo se puede utilizar en motores que tengan conexiones de doble voltaje (por ejemplo, 3x220V y 3x380V). El voltaje más bajo debe ser igual al voltaje de la red y el otro 1,73 veces mayor (por ejemplo, 220/380V o 380/660V). Este arrancador se implementa con dos contactores como se muestra en la figura 2.9.

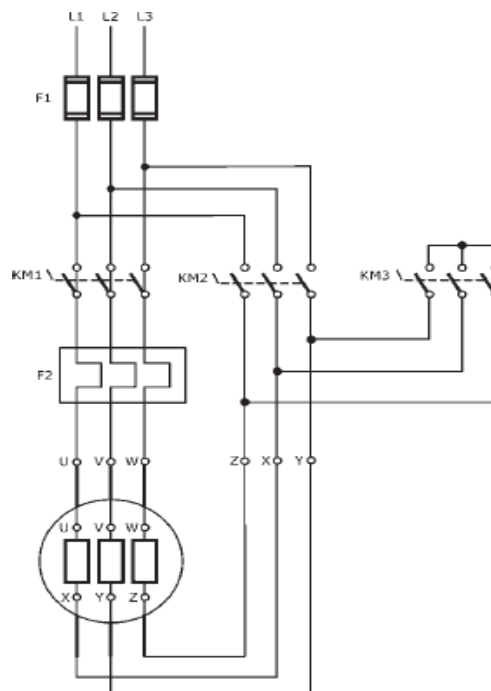


Figura 2.9 Arranque estrella - triángulo de un motor de inducción trifásica

Al arrancar, el motor se conecta a la conexión de mayor tensión, esto permite una reducción de hasta $1/3$ de la corriente de arranque del motor. El arrancador estrella-triángulo puede ser utilizado cuando la curva de torque del motor es lo suficientemente alta para garantizar la aceleración de la máquina con corriente reducida, o sea, el torque resistivo de la carga no debe ser mayor que el torque del motor cuando el motor está en estrella.

beneficios

- costo reducido;
- la corriente de arranque se reduce a $1/3$ en comparación con el arranque directo;
- no hay limitación en el número de maniobras/hora.

desventajas

- reducción del par de arranque a aproximadamente $1/3$ del nominal;
- se requieren motores con seis terminales;

- si el motor no puede alcanzar al menos el 90% de la velocidad nominal, el pico de corriente en el paso de estrella a triángulo es equivalente al del arranque directo;

Arranque compensador (autotransformador): este arrancador alimenta al motor con tensión reducida en sus devanados, en el arranque. La reducción de tensión en las bobinas (sólo durante el arranque) se realiza conectando un autotransformador en serie con ellas. Después de que el motor haya acelerado, las bobinas comienzan a recibir tensión nominal. La reducción de corriente

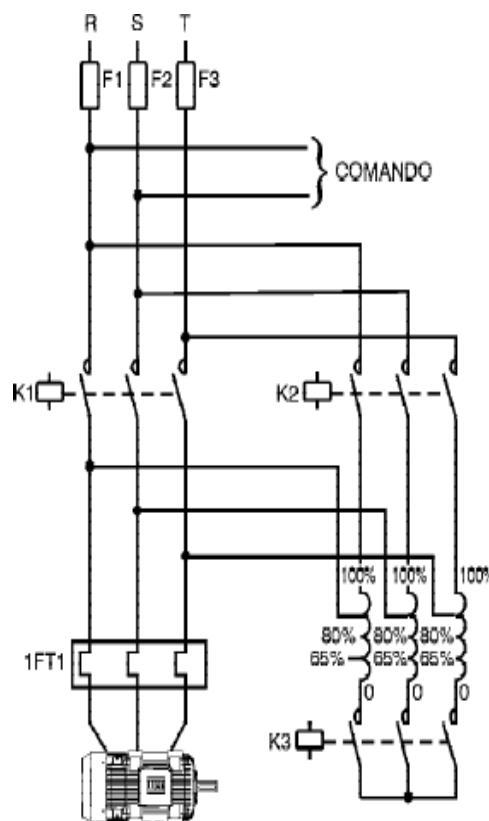


Figura 2.10 Arranque compensador (autotransformador)

depende del TAP al que esté conectado el autotransformador. El arrancador de compensación se puede utilizar para motores que arrancan con algo de carga. Los motores pueden ser de un solo voltaje y solo tres cables disponibles.

beneficios:

- posibilidad de empezar con algo de carga;
- posibilidad de algún ajuste de tensión de arranque, seleccionando el grifo en el transformador;
- solo se requieren tres terminales disponibles en el motor;

desventajas:

- tamaño y peso del autotransformador;
- número limitado de salidas/hora;
- costo adicional del autotransformador.

coincidencia serie-paralelo: este tipo de arrancador también solo se puede utilizar en motores que permiten la conexión de doble voltaje. El voltaje más bajo de los dos voltajes debe ser el voltaje de la red y el otro debe ser el doble (por ejemplo, 220/440V o 380/760V). Para este propósito, el motor debe tener 9 o 12 terminales de conexión para permitir conexiones serie triángulo, paralelo triángulo, serie estrella, paralelo estrella.

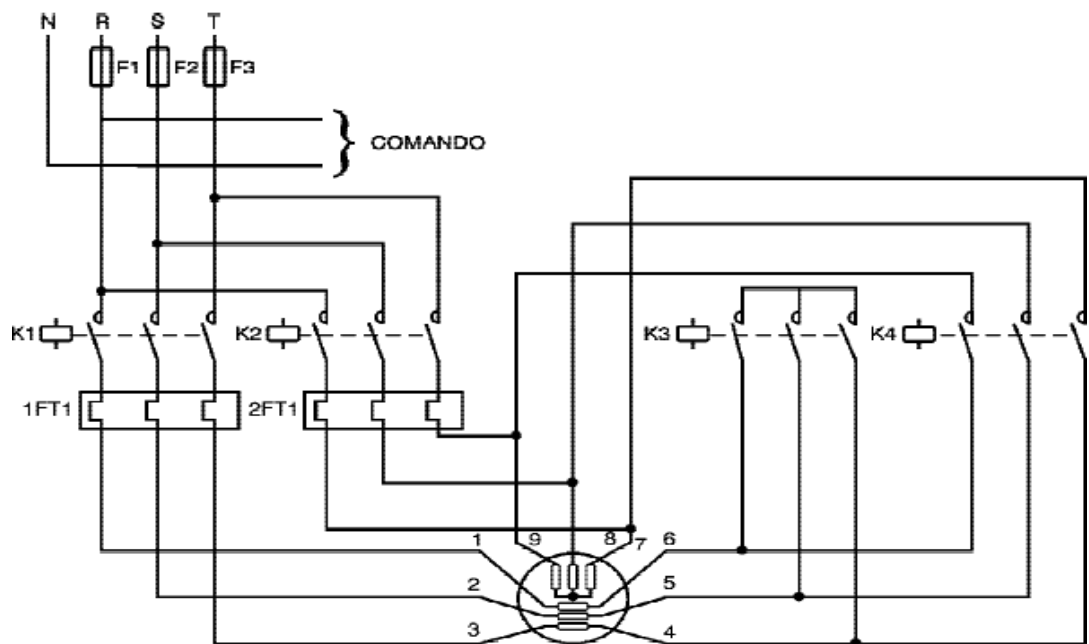


Figura 2.11 Arranque serie - paralelo de un motor de inducción trifásica

OBS. En el momento del arranque, la corriente se reduce del 25 al 33% de la corriente continua de arranque, sin embargo, lo mismo ocurre con el torque, restringiendo el uso de este interruptor para arranques sin carga.

beneficios:

- bajo costo;
- la corriente de arranque se reduce a $\frac{1}{4}$ en comparación con el arranque directo.

desventajas:

- reducción del par de arranque a aproximadamente $\frac{1}{4}$ del par de arranque nominal;
- se requieren motores con al menos nueve terminales (es decir, la capacidad de cierre de las bobinas para una tensión igual al doble de la tensión de red);
- si el motor no puede alcanzar al menos el 90% de la velocidad nominal, el pico de corriente en la conmutación de la conexión es equivalente al del arranque directo;
- Considerando todas las características antes mencionadas, además de las respectivas ventajas y desventajas de cada uno de los métodos de arranque, es claro que cuanto más suave sea el arranque (arranque) de un motor, menor será el estrés que se generará para él y para todo el sistema en funcionamiento generales. Por tanto, observamos que la corriente de arranque es el principal factor de desgaste eléctrico y mecánico de motores, conductores, equipos de protección y, por tanto, es el que debe ser controlado.

2.3 Arranque suave (Soft-Starter)

El avance de la electrónica de potencia permitió la creación del arrancador de estado sólido, que consta de un conjunto de pares de tiristores (SCR, o combinación de tiristores/diodos), uno en cada terminal de potencia del motor. Por lo tanto, aparecieron los interruptores electrónicos para arranque suave, ahora llamados arrancadores estáticos de arranque suave. *arranque suave* son equipos electrónicos diseñados para controlar la velocidad de arranque de motores eléctricos de corriente alterna. Cuando arrancamos un motor conectando directamente la fuente de alimentación con valores nominales, inicialmente consume corriente de rotor bloqueado (IRB) y produce par de rotor bloqueado (TRB). A medida que el motor acelera, la corriente cae y el par aumenta antes de caer a sus valores nominales a la velocidad nominal. Tanto la magnitud como la forma de las curvas de par y corriente dependen del diseño del motor.

Además de la ventaja del control de tensión (y consecuentemente de control de corriente) durante el arranque, el interruptor electrónico también tiene la ventaja de no tener partes móviles o que generen un arco eléctrico, como los interruptores mecánicos. Este es uno de los puntos fuertes de las llaves electrónicas, ya que su vida útil es mucho más larga (hasta cientos de millones de operaciones).

2.3.1 Principios de funcionamiento de un soft-starter

El principio de funcionamiento de un arrancador estático soft-starter se basa en el uso de SCR's (tiristores) en la configuración antiparalelo, la cual es comandada por una tarjeta de control electrónica, con el fin de ajustar la tensión de salida de acuerdo con la programación realizada por el usuario. Variando el ángulo de disparo del circuito de potencia formado por SCR's, variamos el valor efectivo de la tensión aplicada al motor.

El arrancador estático de arranque suave no cambia la frecuencia o la velocidad como una unidad. Inicialmente, el voltaje al motor es tan bajo que solo puede ajustar el espacio entre las ruedas dentadas o alargar las correas de transmisión, etc., para evitar sacudidas repentinas durante el arranque. Gradualmente, el voltaje y el par aumentan, por lo que la máquina comienza a acelerar. Uno de los beneficios de este método es la posibilidad de comenzar a ajustar el torque a la necesidad exacta, ya sea que el motor esté cargado o no. El uso de un arrancador suave reducirá el punto de partida actual y así evitará caídas de tensión en la red. También reduce el par de arranque y el estrés mecánico en el equipo, lo que reduce los requisitos de servicio y mantenimiento. no todos los arrancadores suaves controlan las tres fases. Veamos estas tres posibilidades.

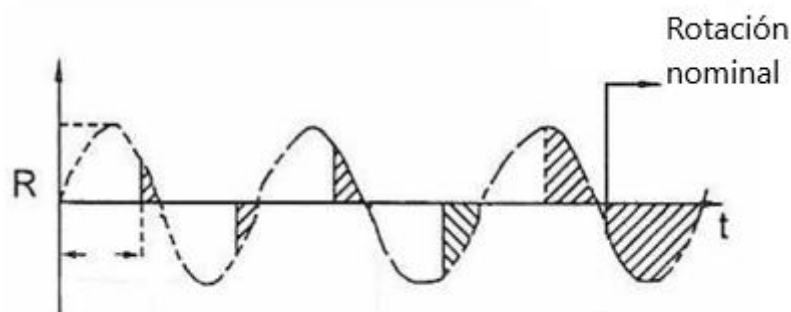


Figura 2.12 Forma de onda de arranque de un arrancador suave

- **Una fase controlada:** hay modelos en el mercado que controlan solo una de las tres fases del juego. Estos modelos son ciertamente más baratos, sin embargo, por razones obvias, más limitados. La fase controlada, por cierto, de hecho, se controla solo en la ventana de tiempo de inicio. Cuando el motor alcanza la velocidad nominal, el arrancador suave funciona como un contactor, conectándolo directamente a la red eléctrica. La única función que permanece en esta función es la protección térmica.

- La figura 2.13 es nuestro primer tipo donde solo la fase R se controla a través de un circuito que avanza o retrasa el ángulo de disparo, y cuyos pulsos de disparo se envían a un TRIAC. Tenga en cuenta que a medida que pasa el tiempo (superada la inercia), el ángulo de disparo disminuye. A medida que disminuye el ángulo de disparo, aumenta el ángulo de conducción, lo que permite que una mayor parte de la sinusoide alcance la carga. Entonces, con un voltaje más alto, tenemos una corriente más alta y, en consecuencia, más par.

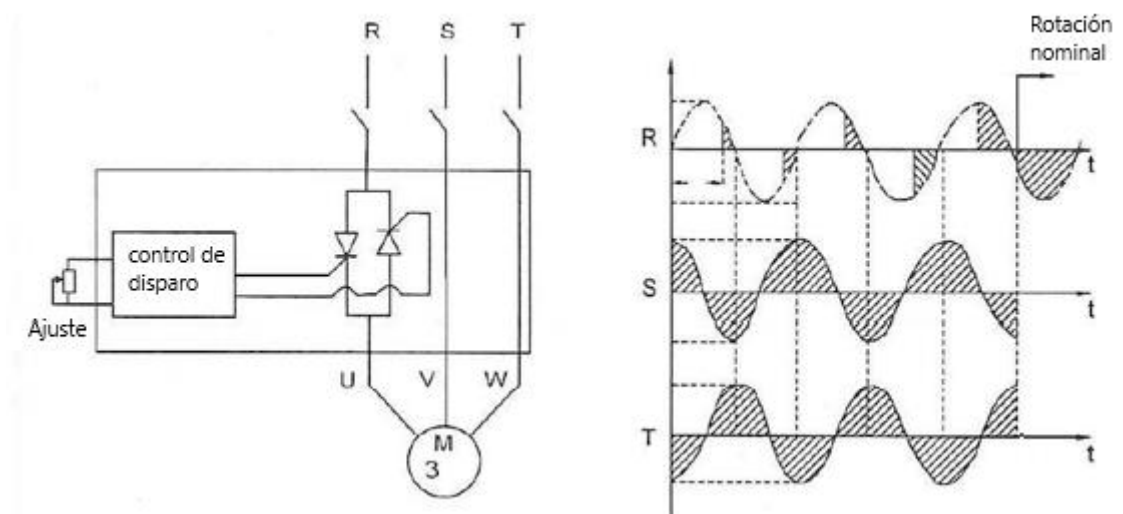


Figura 2.13 Motor trifásico con una fase controlada en el arranque

- Dos fases controladas:** Esta es la arquitectura más popular en el mercado. La siguiente figura ilustra cómo se controlan R y T mientras que S va directamente al motor. No se muestra el circuito de control, ya que es común a estos modelos, cambiando únicamente su complejidad en función del número de pulsos de disparo necesarios para cada arquitectura.

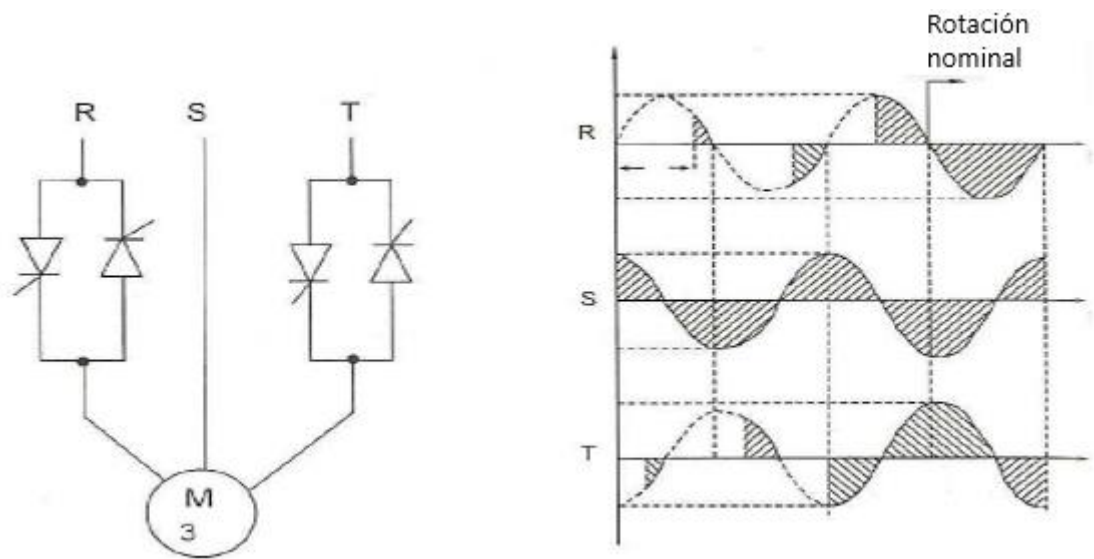


Figura 2.14 Motor trifasico con dos fases controladas en el arranque

- **Tres fases controladas:** la última y mejor arquitectura, donde se controlan las tres fases R, S y T, se puede ver en la figura 2.15. Este es el mejor arrancador suave estático en términos de rendimiento, ya que tenemos el control más preciso y la mayor simetría entre las potencias de las tres fases.

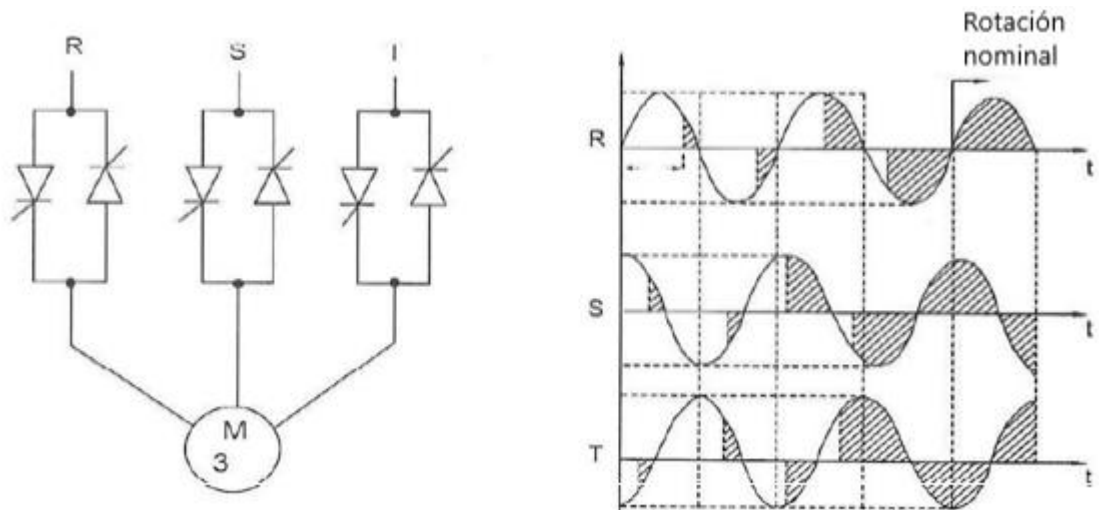


Figura 2.15 Motor trifasico con una fase controlada en el arranque

2.3.2. Circuito control de un soft-starter

El circuito de control de un arrancador suave contiene los circuitos encargados de comandar, monitorear y proteger los componentes del circuito de potencia, así como los circuitos de comando, señalización e interfaz hombre-máquina que serán configurados por el usuario dependiendo de la aplicación.

- **controladores de par:** promover sólo la reducción del par de arranque. Dependiendo del tipo, solo pueden controlar una o dos fases. Como consecuencia, no hay control sobre la corriente de arranque como se logra con tipos más modernos de arrancadores suaves. Los controladores de par con una sola fase deben usarse con contactor y relé de sobrecarga. Son adecuados para pequeñas aplicaciones. El control trifásico debe usarse para arranques frecuentes o con cargas de alta inercia, ya que los controladores monofásicos generan calor adicional al arrancar. Esto sucede porque las bobinas que no están controladas están bajo voltaje nominal. Esta corriente circula por un período más largo que durante un arranque directo, lo que resulta en un sobrecalentamiento del motor. Los controladores bifásicos deben usarse con un relé de sobrecarga, pero pueden arrancar y parar el motor sin un contactor. Sin embargo, el voltaje todavía está presente en el motor incluso si no está funcionando. Si se instala de esta manera, es importante garantizar las medidas de seguridad.
- **controladores de voltaje de lazo abierto:** controle las tres fases y obtenga todos los beneficios que brindan los arrancadores estáticos de arranque suave. Estos sistemas controlan la tensión aplicada al motor de forma preconfigurada y no tienen realimentación de corriente. El rendimiento de arranque se logra mediante la configuración de parámetros como el voltaje inicial, el tiempo de rampa y el tiempo de doble rampa. La parada suave también está disponible. Los controladores de voltaje de lazo abierto también deben usarse con relés de sobrecarga y con contactores, si es necesario. Por lo tanto, son componentes que deben agregarse a otros componentes para formar un sistema de arranque del motor.
- **controladores de voltaje de lazo cerrado:** son una variante del sistema de bucle abierto. Reciben retroalimentación de la corriente de arranque del motor

y usan esta información para detener la rampa del motor cuando se alcanza el umbral de corriente configurado por el usuario. El usuario tiene la misma configuración del sistema que lazo abierto con la adición de límite de corriente. La información de corriente del motor también se usa comúnmente para proporcionar una variedad de protecciones basadas en corriente. Estas funciones incluyen, sobrecarga, pérdida de fase, baja corriente, etc. Estos son sistemas de arranque completos y ambos brindan protección y control de arranque/parada para el motor.

- **controladores de corriente de bucle cerrado:** es el más avanzado de todos. A diferencia de los sistemas de tensión de bucle cerrado, utilizan la corriente como referencia principal. Las ventajas de este enfoque son el control preciso de la corriente de irrupción y el fácil ajuste. Muchos ajustes del usuario pueden realizarse automáticamente mediante sistemas basados en corriente.

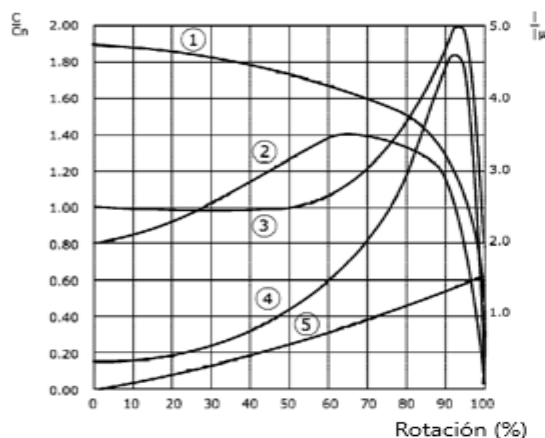
2.3.3. Activación de un soft-stater

Los arrancadores estáticos Soft-Starter que se encuentran en el mercado ofrecen una gran variedad de funciones integradas que se pueden parametrizar, aunque no todas ellas están presentes en las líneas de fabricación de todos los fabricantes. Algunas de estas funciones son:

- control de corriente de arranque;
- selección de curvas de arranque y parada (rampas);
- limitación del nivel de sobrecarga;
- función de “ahorro de energía” (reducción de tensión durante los períodos de baja carga del motor);
- selección del tiempo de frenado;
- protección para sobrecarga de salida y pérdida de fase de entrada;
- protección de cortocircuito de salida.

arrancador electrónico (soft-starter): el arrancador de estado sólido consiste en un conjunto de pares de tiristores (SCR) o combinaciones de tiristores/diodos para cada fase del motor. El ángulo de disparo de cada par de tiristores se controla electrónicamente para aplicar un voltaje variable al motor durante la aceleración. Este

comportamiento a menudo se denomina arrancador suave. Al final del período de arranque, ajustable según la aplicación, la tensión alcanza su valor total después de una aceleración suave o una rampa ascendente, en lugar de estar sometido a una transición brusca, como ocurre con el método de arranque por conexión estrella-triángulo, por ejemplo. Con esto, es posible mantener la corriente de arranque cercana a la nominal y con una variación suave, según se desee. Además de la ventaja de controlar la corriente durante el arranque, el interruptor electrónico también tiene la ventaja de no tener partes móviles o que generen un arco eléctrico, como en los interruptores electromecánicos. Este es uno de los puntos fuertes de los interruptores electrónicos, ya que su vida útil es mayor, así como de los componentes accesorios (contactores, fusibles, cables, etc.). Aun así, como recurso adicional, el arrancador suave presenta la posibilidad de realizar una desaceleración suave (soft-stop) para cargas de baja inercia.



dónde:

- 1 – corriente continua de arranque;
- 2 – corriente de arranque con soft-starter;
- 3 – par de arranque directo;
- 4 – par de arranque con soft-starter;
- 5 – par de carga.

Figura 2.16 Curva par por corriente. comparación entre arrancador directo y arrancador suave

beneficios:

- corriente de arranque cercana a la corriente nominal;
- no hay limitación en el número de maniobras/hora;
- larga vida útil, ya que no tiene partes electromecánicas móviles;
- par de arranque cercano al par nominal;
- También se puede utilizar para reducir la velocidad del motor.

desventajas:

mayor costo a medida que se reduce la potencia del motor.

Dependiendo del modelo y fabricante, estos equipos pueden ofrecer una amplia variedad de indicaciones de condiciones de operación (LED's), entradas analógicas y salidas de relé, que permiten la integración con sistemas de supervisión. Hay fabricantes que ofrecen software para seleccionar el arrancador más adecuado, mediante la simulación de parámetros específicos de las condiciones de funcionamiento, como datos de la red, datos del motor, datos de la carga, requisitos exigidos para aplicaciones especiales, etc. Es posible conectar un arrancador estático de arranque suave para arrancar un motor usando dos conexiones diferentes, como se muestra a continuación:

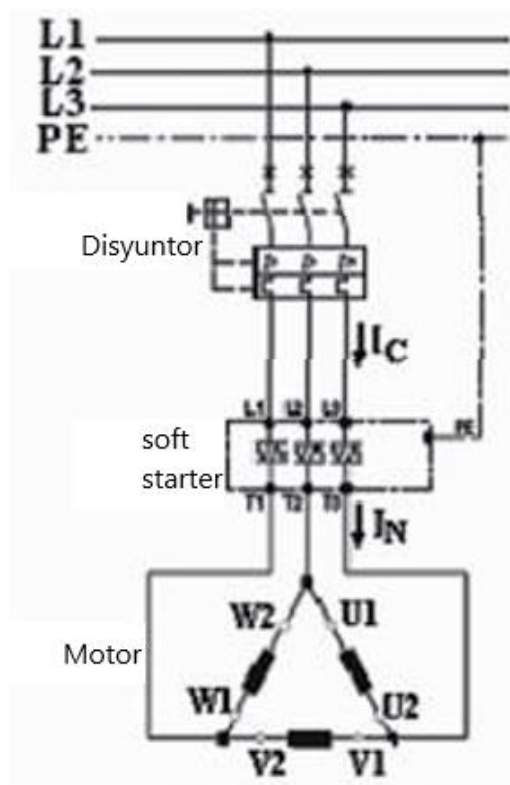


Figura 2.17 Arranque suave con el arrancador Soft-starter en línea con el motor (OSE, Arranque suave con el arrancador Soft starter, 2007)

1ra solución: inserción del arrancador suave en línea con el motor. En la representación anterior, la protección del soft-starter se realiza mediante un disyuntor de motor. En esta solución, la corriente I_C es absorbida de la red por el arrancador suave, y la corriente a suministrar al motor, cuando está en régimen permanente, es la corriente nominal I_N del motor. El cableado entre el arrancador suave y el motor requiere solo los tres conductores para las fases.

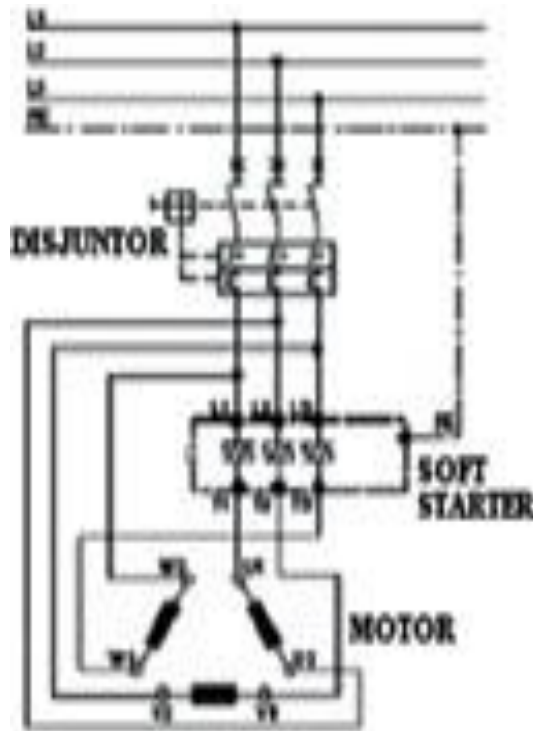


Figura 2.18 Arranque suave con el soft-start insertado en el “Δ” del motor (OSE, Arranque suave con el soft-start insertado en el delta del motor, 2007)

2da solución: inserción del arrancador suave dentro del “Δ” del motor. En la representación anterior, la protección del soft-starter se realiza mediante un disyuntor del motor. En esta solución, la corriente que debe suministrar el arrancador soft-starter al motor, cuando está funcionando, será solo el 58% de la corriente I_N (corriente nominal del motor). $U1-U2$, $V1-V2$ y $W1-W2$ son los extremos de los devanados de cada fase del motor. $L1-T1$, $L2-T2$ y $L3-T3$ son las entradas y salidas del arrancador suave.

Para utilizar la segunda solución, es necesario que el motor tenga ambos extremos de sus conexiones de fase accesibles, lo que implica una mayor longitud de cables (con secciones más pequeñas). Sin embargo, como el arrancador suave suministrará solo el 58% de la corriente nominal con una conexión en triángulo, obviamente será menos costoso. Además del dispositivo de protección contra cortocircuito aguas arriba del arrancador suave, las normas internacionales exigen un equipo de seccionamiento manual para su aislamiento, en caso de mantenimiento, que puede ser un seccionador con fusibles, un interruptor con fusibles o incluso un contactor.² Al igual que en los otros tipos de arranque vistos anteriormente, la coordinación del arranque con un arrancador suave se puede realizar mediante tanto disyuntores como fusibles para la

protección de fuentes de alimentación, aunque algunos fabricantes recomiendan el uso de coordinación con fusibles ultrarrápidos, adecuados para la protección de semiconductores. Un recurso que se puede utilizar, principalmente en motores de funcionamiento continuo y con alta potencia, es el uso de contactores de “bypass”, normalmente alimentando el motor después del arranque suave, que serán desactivados, con el objetivo de minimizar las pérdidas de energía y disipación de calor generada por componentes electrónicos de potencia.

2.3.4 Funciones parametrizables de un soft-starter

-rampa de tensión en aceleración: los arrancadores estáticos soft-starter tienen una función muy sencilla que consiste en, mediante el control de la variación del ángulo de disparo del puente de tiristores, generar en su salida una tensión efectiva que va aumentando progresiva y continuamente, hasta alcanzar la tensión deseada. Es necesario mencionar que cuando ajustamos un tiempo de rampa y un valor de voltaje de arranque, esto no significa que el motor acelerará de cero a su velocidad nominal. En realidad, esto dependerá de las características dinámicas del sistema motor/carga, tales como: sistema de acoplamiento, momento de inercia de la carga reflejada al eje del motor, desempeño de la función de limitación de corriente, etc. (tanto el valor de la tensión de arranque como el tiempo de rampa son valores regulables dentro de un rango que puede variar de un fabricante a otro).

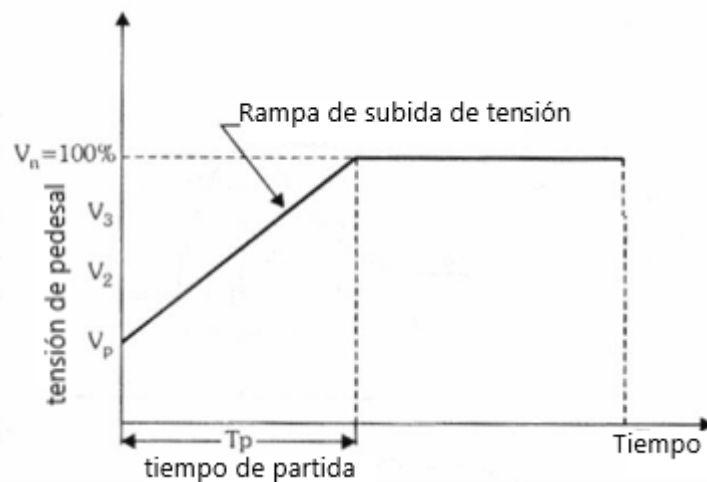


Figura 2.19 Rampa de aceleración del arrancador soft-starter (WEG, Guías de aplicación de arrancadores suaves, 2008)

No existe una regla práctica que se pueda aplicar para definir cuál debe ser el valor de tiempo a ajustar y cuál es el mejor valor de tensión de arranque para que el motor pueda garantizar la aceleración de la carga. La mejor aproximación se puede lograr calculando el tiempo de aceleración del motor.

-rampa de tensión en deceleración: existen dos posibilidades para ejecutar el paro del motor, por inercia o controlado, respectivamente.³

- **en la parada por inercia**, el arrancador suave lleva la tensión de salida instantáneamente a cero, lo que implica que el motor no produce ningún par en la carga, que, a su vez, perderá velocidad hasta que se disipe toda la energía cinética.
- **en parada controlada**, el arrancador suave reducirá gradualmente la tensión de salida a un valor mínimo en un tiempo predefinido. Lo que sucede en este caso se puede explicar de la siguiente manera: al reducir el voltaje aplicado al motor, éste perderá par; la pérdida de par se refleja en el aumento del deslizamiento; un mayor deslizamiento hace que el motor disminuya la velocidad. Si el motor pierde velocidad, la carga impulsada también perderá. Este tipo de característica es muy importante para aplicaciones que deben tener una parada suave desde el punto de vista mecánico. Podemos citar como ejemplo bombas centrífugas, transportadores, etc.

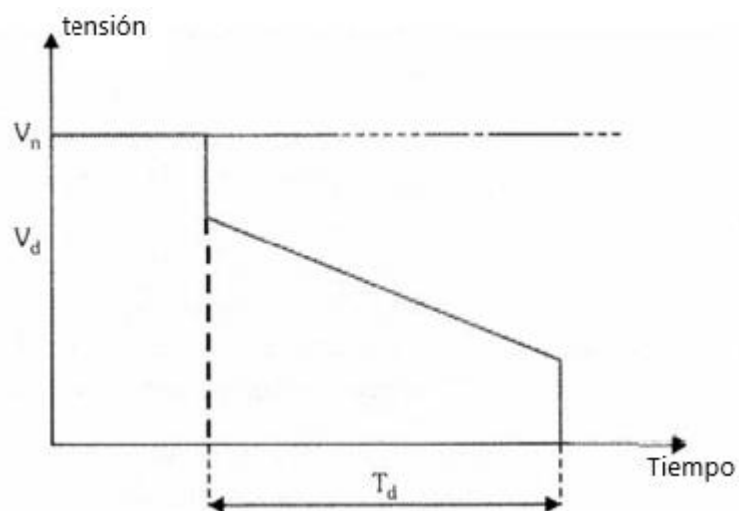


Figura 2.20 Rampa de desaceleración del arrancador suave

- **en el caso particular de las bombas centrífugas**, esta característica minimiza el efecto del “golpe de ariete”, que puede causar graves daños a todo el sistema hidráulico, comprometiendo componentes como válvulas y tuberías, así como la propia bomba.

- **Golpe de ariete:** El “golpe de ariete” es un “pico de presión” que resulta de una rápida reducción en la velocidad de un líquido, que puede ocurrir cuando un sistema de bombeo se detiene repentinamente. En el contexto de la aplicación del arrancador suave, la ocurrencia del golpe de ariete está relacionada con la parada rápida del motor de la bomba, aunque puede ser causada por otros eventos, como el cierre rápido de una válvula. La presión máxima en estas condiciones puede ser varias veces superior a la esperada por el sistema, lo que provoca daños que pueden extenderse a la bomba. Cuando el arrancador suave está habilitado para realizar una parada suave del motor (“Control de bomba”), se reduce la posibilidad de que se produzca un golpe de ariete cuando se detiene el motor.

- **puntapié inicial:** hay cargas que, en el momento del arranque, requieren un esfuerzo extra de accionamiento debido al elevado par resistivo. En estos casos, normalmente el arrancador soft-starter necesita aplicar una tensión superior a la establecida en la rampa de tensión de aceleración al motor. Esto es posible usando una función llamada “kick start”. Como podemos ver en la figura 2.21, esta función hace que se aplique un pulso de voltaje al motor con amplitud y duración programables para que el motor pueda desarrollar un par suficiente potencia de arranque para superar la fricción, acelerando así la carga. Debe tener mucho cuidado con esta función, ya que solo debe usarse en los casos en que sea estrictamente necesario.

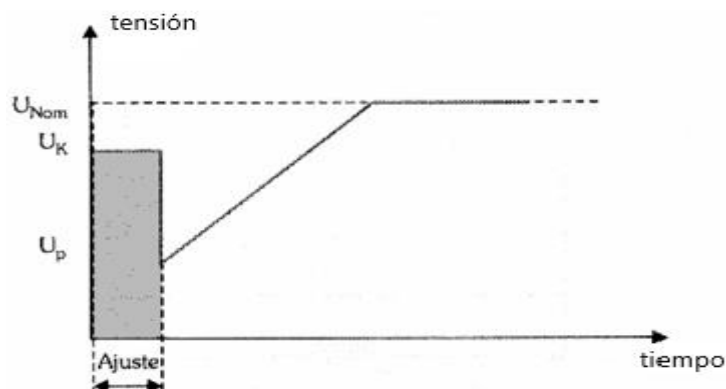


Figura 2.21 Pulso de tensión en el arranque del arrancador suave (WEG, Guía de aplicación de arrancadores suaves)

OBS. *Debemos observar algunos aspectos importantes relacionados con esta función, ya que podría ser malinterpretada y, de esta manera, comprometer la definición en cuanto a su uso, incluido el del propio sistema de accionamiento. Como la tensión de arranque se puede ajustar cerca de la tensión nominal, incluso por un corto período de tiempo, la corriente alcanzará valores muy cercanos a los registrados en el catálogo del motor o en la ficha técnica. Esto es claramente indeseable, ya que el uso del arrancador suave en estos casos surge de la necesidad de garantizar un arranque suave, ya sea eléctrica o mecánicamente. De esta forma, podemos considerar este recurso como el que se debe utilizar en última instancia, o cuando la condición severa de partida es realmente evidente.*

- **limitación actual:** en la mayoría de los casos en los que la carga tiene una gran inercia, se utiliza la llamada función de limitación de corriente. Esta función hace que el sistema de red/arrancador suave suministre al motor solo la corriente necesaria para ejecutar la aceleración de la carga. Este recurso es siempre muy útil, ya que garantiza un arranque realmente suave y, mejor aún, permite arrancar motores en lugares donde la red está al límite de su capacidad. Normalmente en estos casos, la condición actual en el arranque hace que actúe el sistema de protección de la instalación, impidiendo así el normal funcionamiento de toda la instalación. Existe entonces la necesidad de imponer un valor límite de corriente de arranque para permitir la activación del equipo, así como de toda la industria en la que está instalado.

La limitación de corriente también se utiliza mucho en el arranque de motores cuya carga tiene un momento de inercia mayor. En términos prácticos, podemos decir que esta función debe utilizarse después de que la rampa de tensión simple no tenga éxito, o incluso cuando, para que el motor acelere la carga, sea necesario ajustar una rampa de tensión de tal forma que el voltaje de arranque cercano a los niveles de otros sistemas de arranque como, por ejemplo, interruptores compensadores, sin que esto sea en modo alguno un factor prohibitivo en la elección del sistema de arranque.

- **control de bomba:** esta función se utiliza especialmente para la aplicación de tarta blanda en sistemas de bombeo. En realidad, es una configuración específica (predefinida) para atender este tipo de aplicaciones, donde normalmente es necesario establecer una rampa de tensión en aceleración, una rampa de tensión en deceleración y la habilitación de protecciones. La rampa de tensión en deceleración se activa para

minimizar los golpes de ariete, perjudiciales para el conjunto del sistema. También están habilitadas las protecciones de secuencia de fases y mínima corriente inmediata (para evitar la cavitación).

- *OBS. La cavitación es la formación de burbujas a través del interior de la bomba. Con las bombas centrífugas, la cavitación puede ocurrir cuando el valor de succión llega a ser lo suficientemente alto dentro de la bomba. Cuando estas burbujas atraviesan la bomba, se libera una gran cantidad de energía que provoca daños. Cuando el arrancador soft-starter está correctamente habilitado para realizar la protección contra baja corriente ("Control de bomba"), la bomba está protegida contra la cavitación prolongada.*

2.3.5 Solicitud en ahorro de energía

Un arrancador suave que incluye características de optimización de energía simplemente cambia el punto de operación del motor. Esta función, cuando está activada, reduce el voltaje aplicado a las terminales del motor para que la energía necesaria para alimentar el campo sea proporcional a la demanda de carga. En términos prácticos, solo se puede observar una optimización con resultados significativos cuando el motor está operando con cargas inferiores al 50% de la carga nominal. Esto, por cierto, es muy difícil de encontrar, ya que estaríamos hablando de motores muy sobredimensionados, que, en la actualidad, y debido a la creciente preocupación por el despilfarro energético y el factor de potencia, se está evitando a toda costa.

Cabe señalar que este tipo de optimización energética tiene algunos inconvenientes, principalmente la generación de tensiones y corrientes armónicas y variaciones en el factor de potencia. En este caso, los armónicos pueden causar problemas relacionados con daños y reducción de la vida útil de los capacitores para corrección del factor de potencia, sobrecalentamiento de transformadores e interferencia en equipos electrónicos.

2.4 Convertidores de frecuencia

Hace unos años, para tener un control preciso de la velocidad de cualquier sistema industrial, se necesitaban motores de corriente continua. Sin embargo, esto trajo como consecuencia varios problemas tales como: costo del motor, necesidad de rectificación de

voltaje, mantenimiento, etc. Con los avances en la electrónica de potencia, y con la necesidad de aumentar la producción, aparecieron una serie de equipos en el área de automatización, desarrollados para trabajar con motores de corriente alterna.

El convertidor de frecuencia es uno de esos equipos. Versátil y dinámico, permitió el uso de motores de inducción para el control de velocidad en lugar de motores de corriente continua.

Las razones para el control de la velocidad son las más variadas posibles. Este control puede ser necesario cuando se quiere ajustar la velocidad de un motor eléctrico para acelerar el proceso, o quizás ajustar el par de un conjunto según las necesidades del proceso, o incluso reducir el consumo de energía con una mayor eficiencia.

2.4.1. Bloques componentes de un convertidor de frecuencia

La figura ilustra la construcción interna de un convertidor de frecuencia.

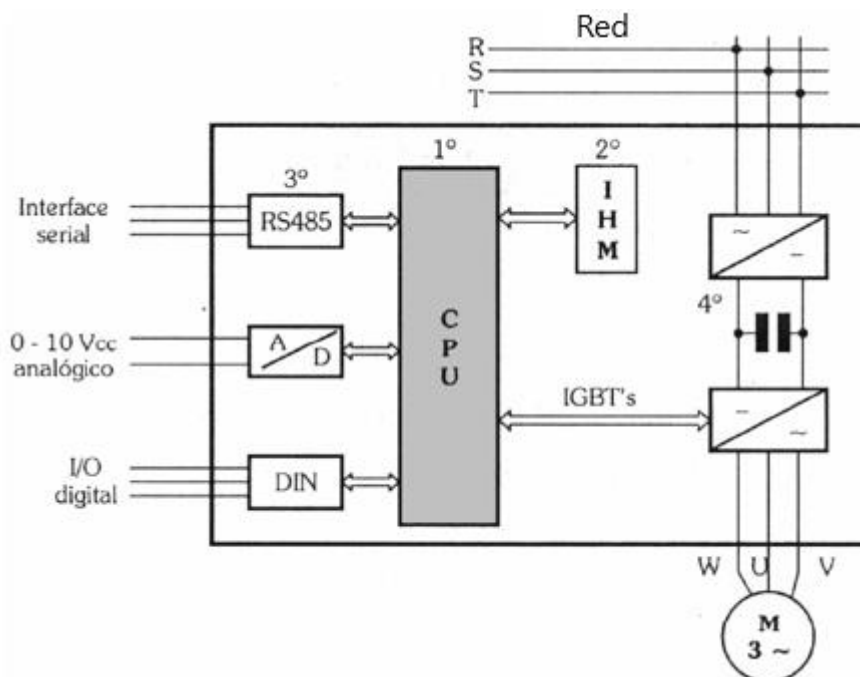


Figura 2.22 Bloques de componentes de un convertidor de frecuencia

(WEG, Guía de aplicación de convertidores de frecuencia, 2010)

especificando cada uno de sus componentes, tenemos:

- **Unidad Central de procesamiento (CPU):** formado por un microprocesador o microcontrolador (fabricante); bloque donde se almacena toda la información (parámetros y datos del sistema) – en la memoria integrada; realiza la función más

vital para el funcionamiento del inversor: generación de pulsos de disparo para los IGBT;

- **interfaz hombre-máquina (HMI):** podemos visualizar lo que sucede en el inversor (display) y parametrizarlo según la aplicación (teclas), tales como: tensión, corriente, frecuencia, estado de alarma, sentido de giro, modo de funcionamiento (local o remoto), encendido/apagado, etc.
- **interfaces:** dos tipos de señales (analógicas o digitales); por ejemplo, control de velocidad = voltaje de control analógico del control numérico por computadora (CNC)
- **etapa de potencia:** compuesto por un circuito rectificador, que a través de un circuito intermedio denominado “DC bus” alimenta el circuito de salida del inversor (módulo IGBT); rectificador = convertidor que transforma CA y CC (entrada sinusoidal, salida semiciclo positiva); inversor = tipo especial de convertidor que convierte CC en CA (entrada continua, salida cuadrada).

2.4.2. Diagrama de bloques de un convertidor de frecuencia

La figura 2.23 muestra un convertidor de frecuencia representado por un diagrama de bloques. Vamos a explicar en detalle la función de cada uno de estos bloques.

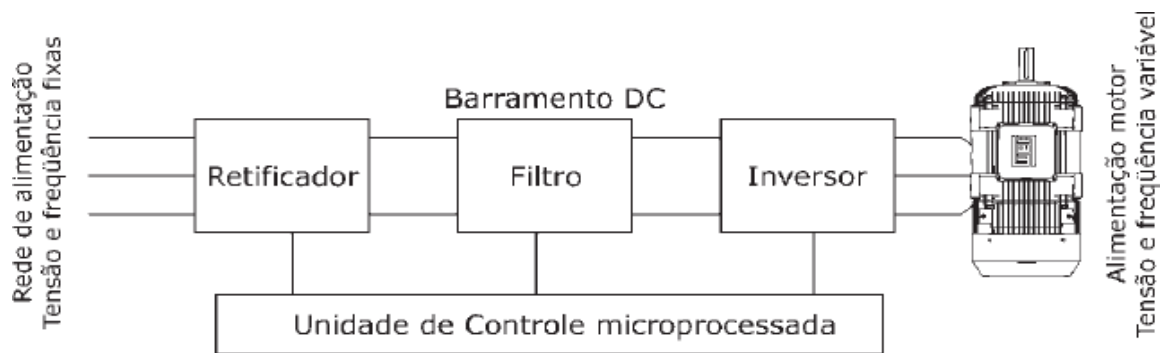


Figura 2.23 Diagrama de bloques de un convertidor de frecuencia (WEG, Guia de aplicação de convertidores de frecuencia, 2010)

- **rectificador:** transforma la señal alterna (onda completa) en una señal rectificada (media onda), teniendo como valor final $V_{cc} = 1,41 \times V(\text{rede})$ (valor de tensión continua). Un voltaje alterno en un diodo se convierte en un voltaje de CC pulsante, por lo que NO es posible controlar la intensidad de la corriente. La señal tendrá la ondulación reducida por medio de condensadores de filtro. Este circuito forma una fuente de corriente continua simétrica, debido a la existencia de un punto de tierra

como referencia. Con una lógica provista por el circuito de control, los transistores (IGBT's) actúan para alternar la dirección de la corriente que circula por el motor; frecuencia de conmutación: 300 Hz – 20 kHz.

- **filtrar** (Link CC): tiene la función de regular la tensión rectificada con almacenamiento de energía a través de un banco de capacitores.
- **sistema de control**: se puede dividir en 4 partes: control del inversor, lectura de la velocidad del motor, lectura de corriente e interfaces (configuración de parámetros, E/S analógicas y digitales).
- **inversor**: donde se encuentran los transistores (IGBT's) encargados de invertir la tensión continua proveniente del enlace DC en una señal alterna, con tensión y frecuencia variable.

- cargas ligeras: $V_{cc} = 1.41 \times V(red)$

- cargas pesadas (a plena carga): $V_{cc} = 1,35 \times V(red)$

2.4.3 operación de un convertidor de frecuencia

El convertidor de frecuencia funciona según el principio de que la tensión de línea de CA se convierte en tensión de CC. Este voltaje de CC se convierte luego en CC pulsada cuyo valor RMS simula un voltaje de CA. Por lo general, la frecuencia de salida de este voltaje de CA varía de cero a la frecuencia de la línea de entrada de CA. En algunas aplicaciones, la frecuencia puede exceder la frecuencia de línea. Si bien existen variadores de CA regulados por corriente de alto rendimiento capaces de operar en "modo de par", el variador de voltios por hercio es lo que cubriremos predominantemente aquí.

El inversor de frecuencia más común producido hoy en día es uno que usa modulación de ancho de pulso para crear la forma de onda de salida. Los componentes activos utilizados en los inversores son diodos, SCR, transistores e

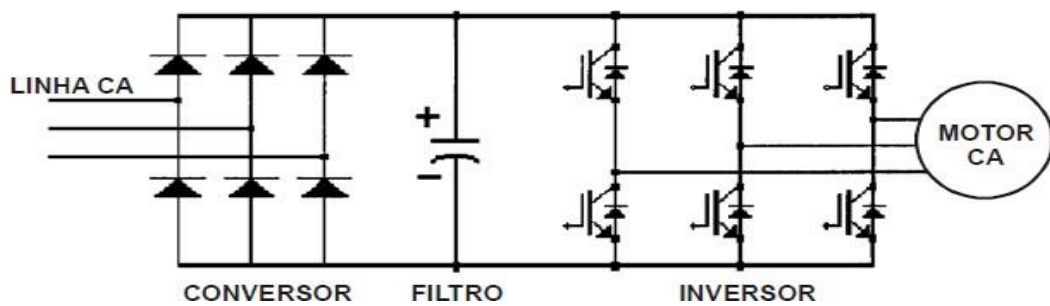


Figura 2.24 Construcción electrónica de un convertidor de frecuencia (Druves & Bradley, 2010)

IGBT. Estos inversores tienen tres secciones diferentes y distintas de su circuito de alimentación, como se muestra en la figura 2.24:

La primera sección utiliza un puente de SCR de onda completa para convertir la tensión de línea de CA en CC. El filtrado de esta tensión continua se realiza en el segundo tramo con un condensador para suministrar al puente inversor una tensión continua estable. Un filtro de bus de CC generalmente se encuentra en unidades de 10 HP o más. La sección final utiliza un IGBT o un puente de transistores para suministrar un voltaje de CC modulado por ancho de pulso (PWM) al motor. El voltaje RMS efectivo suministrado al motor depende de la frecuencia de salida fundamental que está impulsando el puente inversor. Esto es lo que lleva al término "inversor de voltios por hertzio".

La sección de control o lógica del variador y los ajustes programados por el usuario determinan la salida de frecuencia del variador. Durante la aceleración, la frecuencia variará según un algoritmo predeterminado como una rampa lineal o una curva en S, desde el mínimo o cero hasta la velocidad comandada. El variador también se puede programar para omitir ciertas frecuencias que pueden causar resonancia mecánica.

2.4.4. Modulación de ancho de pulso (PWM)

Como los transistores funcionan como interruptores de "encendido o apagado", la forma de onda de salida del convertidor de frecuencia siempre es cuadrada. Para obtener un voltaje de salida más cercano a la sinusoidal, los transistores conmutan modulando su ancho de pulso a través de una técnica llamada PWM (Pulse Width Modulation).

El IGBT se enciende durante un breve período de tiempo, lo que permite que solo una pequeña cantidad de corriente llegue al motor. Luego, el IGBT se enciende durante períodos de tiempo más prolongados, lo que permite corrientes más altas en

el motor hasta que alcanza la corriente nominal del motor. Después de eso, el IGBT se enciende por períodos de tiempo progresivamente más cortos, disminuyendo la corriente aplicada al motor. Cuanto más sinusoidal sea la corriente de salida PWM, mayor será la reducción de pulsaciones y pérdidas de par, por lo que tendremos las siguientes formas de onda de tensión y corriente a la salida del inversor.

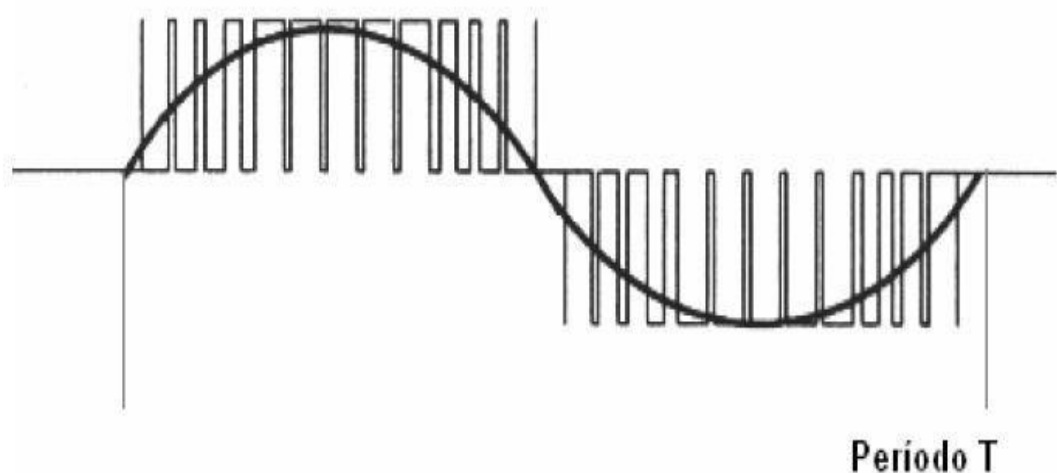


Figura 2.25 Modulación de Ancho de Pulso (Rashid, 2010)

Consideraciones importantes sobre el control de voltaje y frecuencia:

- a bajas frecuencias de salida, los dispositivos de conmutación se encienden durante un breve período de tiempo, con pequeñas tensiones y corrientes aplicadas al motor.
- a altas frecuencias de salida, se requiere un alto voltaje. Los dispositivos de conmutación se encienden durante un período prolongado de tiempo, lo que permite aplicar corrientes y voltajes más altos al motor.

Cuanto mayor sea la frecuencia de conmutación, más sinusoidal será la forma de onda resultante, aunque el ruido aumenta significativamente ya que es proporcional a la frecuencia de conmutación.

Los inversores deben asegurarse de que la variación del voltaje aplicado sea proporcional a la frecuencia, lo que se logra ajustando automáticamente los disparos de los transistores mediante sistemas de microprocesadores. Para motores de servicio normal, no es necesario un ajuste muy fino del control de velocidad o par. Para estos casos, una precisión de carga del 3 al 5% con una variación de carga de hasta el 100% del par nominal es bastante razonable. Por lo general, el rango de variación de frecuencia es pequeño, entre 6 y 100 Hz.

2.4.5. Clasificación de convertidores de frecuencia

Los dispositivos de arranque que utilizan PWM como esquema tienen diferentes niveles de rendimiento basados en algoritmos de control. Hay cuatro tipos básicos de control ampliamente utilizados: escalar (voltios/Hz), control vectorial sin sensor, control vectorial de flujo y control orientado al campo.

- **control escalar (V/Hz):** es un método básico que proporciona frecuencia variable para aplicaciones tales como ventiladores y bombas. Proporciona un control de velocidad de torsión razonable a bajo costo;
- **control vectorial sin sensor:** proporciona una mejor regulación de la velocidad y tiene la capacidad de producir un alto par de arranque;
- **control de flujo vectorial:** permite una mayor precisión de par y velocidad con respuesta dinámica;
- **control orientado al campo:** Le permite mantener la velocidad y el par disponibles para los motores de CA, proporcionando un rendimiento de CC para los motores de CA.

Los dos últimos tipos son técnicas de control más recientes para convertidores de frecuencia, y debido a la falta de literatura técnica disponible para consulta, se sugerirán como tema para futuros estudios.

2.4.6. Control escalar (voltios/Hz)

Impone cierta tensión/frecuencia al motor, buscando mantener constante la relación V/f , o sea, el motor trabaja con un flujo aproximadamente constante; este control se aplica cuando no hay necesidad de respuestas rápidas a los comandos de par y velocidad; el voltaje aumenta hasta el valor de voltaje nominal del motor, y luego solo continúa aumentando la frecuencia.

Esta familia de convertidores está compuesta por sistemas cuyos requerimientos se restringen al control de la velocidad del motor, sin control del par desarrollado y sin conocimiento de la dinámica del proceso bajo control. Son sistemas que imprimen un cierto error de velocidad que, dada la aplicación, puede ser fácilmente asimilado por el sistema controlado. Los motores accionados por esta familia de convertidores tienen o deben cumplir con los requisitos normales, y el control se realiza en lazo abierto (sin realimentación), es decir, no hay tacogenerador instalado en el eje del motor para realimentar la estructura controlada por el convertidor.

Para información, el rango de frecuencias operadas es de 10 a 60 Hz; para el control escalar la forma más simple es volt/hertz y utiliza la referencia de velocidad a través de una fuente externa, y varía el voltaje y la frecuencia aplicada al motor.

2.4.6.1. Características de control escalar

Con el aumento de la frecuencia de la señal impuesta al inducido del motor y el mantenimiento del valor de la tensión, la corriente magnetizante de la máquina descende proporcionalmente y con ella el flujo establecido entre el entrehierro. Por lo tanto, al reducir el flujo magnético, se reduce el par proporcionado por esta corriente: operación de debilitamiento de campo. Algunas de las posibles soluciones son: especificar un motor con un mayor factor de servicio, aumentando la clase de aislamiento para que las bobinas puedan soportar temperaturas más altas, o un motor con una carcasa más grande para que haya una mayor área de intercambio térmico; en motores con ventilación independiente de la velocidad del eje, dentro de un rango que va de 10 Hz a la frecuencia nominal, es posible obtener un par del 90% del nominal. Se debe tener especial cuidado al aplicar convertidores para accionar motores de baja velocidad, ya que, en estos casos, típicamente por debajo del 50% de la velocidad nominal, el flujo de aire a través del bastidor es deficiente. La eliminación de calor se ve afectada y la potencia suministrada por el motor debe reducirse para no quemar los materiales aislantes de su devanado de armadura. En resumen, podemos hacer las siguientes consideraciones sobre el control escalar:

- tiene un costo menor en comparación con el inversor con control vectorial;
- el control escalar se utiliza en aplicaciones normales que no requieren alta dinámica (gran aceleración y frenado), alta precisión o control de par;
- tiene precisión de hasta 0,5% de la rotación nominal para sistemas sin variación de carga, y de 3 a 5% con variación de carga de 0 a 100% del par nominal;
- se utiliza en lazo abierto, es decir, sin lectura de la velocidad del motor a través de un sensor, y la precisión de la velocidad es función del deslizamiento del motor, que varía según la carga;
- este control no está indicado para motores de baja velocidad (<5Hz), porque a bajas velocidades el par es generalmente pequeño;

- muchos convertidores de frecuencia incluyen un par de arranque adicional, que permite aumentar la relación V/f al arrancar para aumentar el flujo y, en consecuencia, el par de arranque;
- algunos modelos tienen funciones especiales como compensación de deslizamiento (que atenúa la variación de velocidad en función de la carga), y aumento de tensión (aumento de la relación V/f para compensar el efecto de la caída de tensión en la resistencia del estator), haciendo que la capacidad de par se pueda mantener.

El control escalar se utiliza básicamente por su sencillez y también porque la gran mayoría de las aplicaciones no requieren alta precisión y/o rapidez en el control de velocidad.

2.4.7. Control vectorial

Recomendado en aplicaciones donde se requieren altas prestaciones dinámicas, respuestas rápidas y alta precisión en la regulación de la velocidad. Se recomienda que el motor proporcione un control de par preciso en una amplia gama de condiciones de funcionamiento.

Las máquinas de corriente continua con sistemas de control de circuito cerrado ya cumplían con estos requisitos y, en la activación de energía, tenían un control completo. A menudo se usaban debido a la proporcionalidad de la corriente de armadura, el flujo y el par que permitían controlarlos de forma directa. Sin embargo, con el avance de la electrónica de potencia, la aplicación de motores de corriente continua se ha reducido drásticamente.

OBS.: *Justificando el nombre VECTOR: la corriente que circula en el estator (I_s) se puede dividir en dos componentes: un productor de flujo (I_m) y un productor de par (I_r).*

- *corriente total: vector SUMA de I_m e I_r ;*
- *par total: vector PRODUCTO de I_m e I_r .*

Y este es el desafío para el control: ¿distinguir y controlar estos dos vectores de corriente, sin separarlos en dos circuitos distintos.

Existen dos posibilidades para llevar a cabo el control vectorial: en lazo abierto o en lazo cerrado. A continuación, mostraremos sus respectivas definiciones, así como sus valores típicos de trabajo.

- con malla abierta (sin sensor): más simple que el control por sensor, pero tiene limitaciones de par, especialmente a velocidades muy bajas. A velocidades más altas, es tan bueno como el control vectorial con retroalimentación. Al igual que el escalar, opera con un dispositivo de control de frecuencia con compensación de deslizamiento, manteniendo la velocidad actual del motor cercana a la deseada. El ángulo de voltaje del motor controla la cantidad de corriente que entra en el flujo del motor habilitado por el estimador de par actual. Al controlar este ángulo, la operación a baja velocidad y el control del par se mejoran con respecto al escalar.

- Valores típicos para estos inversores:

* regulación de velocidad: 0,1%;

* Regulación de par: NO tiene;

* par de arranque: 250%;

* par máximo (no continuo): 250%;

* control de bucle abierto;

* sintonización automática

- con retroalimentación: Las retroalimentaciones se realizan mediante sensores de corriente y de posición (encoders). El control se realiza desacoplando la corriente del estator (I_r e I_m). El lazo de control de velocidad controla la frecuencia de salida que es proporcional a la velocidad. El bucle de par controla la entrada de corriente al motor que es proporcional al par. La señal de diferencia entre la velocidad deseada y la real se convierte en el punto de referencia para el controlador. Esta señal se compara con el valor de corriente del motor y determina si es necesario acelerar o desacelerar el motor. Hay un lazo de control separado para el flujo de corriente (regulador de corriente). Finalmente, la señal se envía al

Control PWM, que controla los IGBT para que se genere el voltaje y la frecuencia deseados para la salida de acuerdo con el algoritmo PWM.

Beneficios:

- * alto rendimiento dinámico;
- * control de par lineal para aplicaciones de posición o tracción;
- * funcionamiento suave a baja velocidad y sin oscilaciones de par, incluso con variación de carga.
- valores típicos:
- * regulación de velocidad: 0,01%;
- * regulación de par: 0,5%;
- * par máximo de arranque: 400%;
- * Par máximo (no continuo): 400%

2.4.7.1. Curvas par x velocidad y corriente x velocidad

Cuando se accionan motores con un inversor, la corriente de arranque es del orden de la corriente nominal; y alimentando el motor desde 3 o 4 Hz, podemos obtener un par del 150% del nominal, suficiente para accionar cualquier carga acoplada al motor.

Analizando las curvas par x velocidad y corriente x velocidad disponibles en los catálogos de algunos fabricantes, podemos realizar los siguientes análisis:

- **curva par x velocidad:** en el arranque, cuando el motor está conectado directamente a la red, el par será de aproximadamente 2 a 2,5 veces el par nominal, reduciéndose a medida que aumenta la velocidad, hasta alcanzar un valor de 1,5 a 1,7 del par nominal a aproximadamente el 30% de velocidad nominal. A medida que aumenta la velocidad, el par vuelve a aumentar hasta alcanzar su valor máximo (80% de la velocidad nominal), alcanzando su valor nominal a la velocidad nominal.
- **curva de corriente x velocidad:** en el arranque, la corriente que circula por el motor será de 5 a 6 veces mayor que la corriente nominal, reduciéndose a medida que aumenta la velocidad, hasta alcanzar un valor determinado por la carga acoplada al motor. Si se aplica la carga nominal al motor, la corriente absorbida por el mismo será también la nominal.

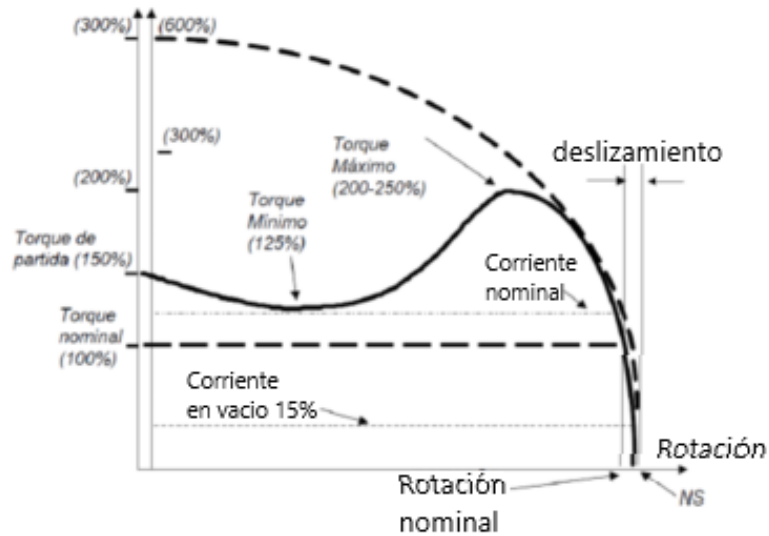


Figura 2.26 Curvas características corriente x velocidad y par x (WEG, curvas características, 2004)

2.4.8. Análisis comparativo: control escalar Control vectorial⁴

- **Escalar:** sólo considera las amplitudes de las magnitudes eléctricas instantáneas (flujos, corrientes, tensiones) referidas al estator, y su ecuación se basa en el circuito equivalente del motor, es decir, son ecuaciones en régimen permanente;
- **vector:** admite la representación de magnitudes eléctricas instantáneas mediante vectores, a partir de las ecuaciones dinámicas de la máquina con las magnitudes referidas al flujo ligado por el rotor, es decir, el motor de inducción es visto por el control vectorial como un motor de corriente continua, con Regulación Independiente para par y flujo.

Tabla 2.1 Comparación entre tipos de control de convertidor de frecuencia y convertidores AC/DC (Clayton, 2012)

	Inversor escalar	inversor		Conversor cc
	Malla cerrada	vectorial		Con tacómetro
Retroalimentación	X	Malla cerrada	Malla abierta	X
Torque en velocidad cero	Imposible	posible	imposible	posible
Regulación de velocidad	Depende del deslizamiento	0.01%	0.20%	0.20%
Control de torque	Muy bajo	alto		Alto

2.5. Funciones parametrizables de un convertidor de frecuencia

Hay varios fabricantes de convertidores de frecuencia en el mercado hoy en día. Obviamente, cada uno tiene unas funciones únicas para diferenciarlos de sus competidores, pero algunos parámetros están presentes en todos ellos. A continuación, te comentamos los más importantes, además de dedicar un poco más de tiempo a la frenada.

- **tipos de rampa de aceleración y deceleración:**
 - lineal: el más utilizado;
 - Rampa en S: reduce los golpes mecánicos a los motores durante las rampas de aceleración y desaceleración.
- **corriente de sobrecarga del motor:** la corriente de sobrecarga del motor es el valor actual a partir del cual el convertidor comprueba si el motor está funcionando en sobrecarga. Cuanto mayor sea la diferencia entre la corriente del motor y la corriente de sobrecarga, más rápido actuará la protección del motor a través del inversor.
- **limitación de corriente de salida máxima:** función utilizada para evitar que el motor se detenga en caso de sobrecargas instantáneas. Cuando aumenta la carga en el motor, también aumenta su corriente; si la corriente intenta superar el valor configurado en este parámetro, la velocidad se reducirá, siguiendo la rampa de deceleración hasta que la corriente caiga por debajo del valor configurado. Cuando la sobrecarga desaparezca, la rotación volverá a la normalidad.

- **elección de la frecuencia de conmutación:**

valores típicos – entre 2,5 kHz y 15 kHz;

- la selección de la frecuencia de conmutación da como resultado un compromiso entre el ruido acústico en el motor y las pérdidas en los IGBT del inversor (calefacción).
- Altas frecuencias de conmutación implican menor ruido acústico en el motor, pero aumentan las pérdidas en los IGBT's, elevando la temperatura en los componentes y reduciendo su vida útil. La reducción de las frecuencias de conmutación contribuye a la reducción de los problemas de inestabilidad y resonancia que se producen en determinadas condiciones de aplicación, así como la emisión de energía electromagnética por parte del inversor; sin embargo, dicha reducción reduce la calidad de la forma de onda de salida.
- **frecuencias evitadas:** se impide que el motor funcione a frecuencias de salida (velocidad), donde el sistema mecánico entra en resonancia provocando vibraciones.
- **rampa de desaceleración:** en este tipo de paro, la frecuencia del convertidor decrece a cero, de acuerdo con el tiempo de desaceleración especificado por el usuario, y puede ser utilizado cuando los requisitos de paro no son muy estrictos (más comúnmente utilizados).

- **frenado:**

- en aplicaciones donde se utiliza el motor de inducción en procesos que requieren paradas rápidas, se necesita un tiempo de desaceleración muy corto y se debe utilizar el recurso del frenado eléctrico o mecánico. Durante el frenado, la frecuencia del rotor es mayor que la frecuencia del estator, lo que provoca un flujo inverso de energía del rotor al estator. El motor funciona entonces como un generador, lo que puede provocar una sobretensión.
- cuando se apaga el variador, se requiere una acción de frenado para reducir la velocidad de la carga mecánica. Para reducir esta energía cinética, es necesario quitar la energía cinética del conjunto que está funcionando (motor AC y carga mecánica) y transformarla en otra forma de energía para que el sistema pueda detenerse. Esta parada se vuelve más difícil a medida que aumenta el tamaño de la carga.

- **OBS.** Muchos arrancadores de motor y convertidores de frecuencia paran el motor quitando su alimentación (desaceleración natural, adecuada para cargas mecánicas).

2.5.1 tipos de frenado de un variador de frecuencia

- **frenado eléctrico:** basado en un sistema donde el motor se utiliza en el momento de la desaceleración como un generador accionado por la carga (variadores de frecuencia).
- **frenado mecánico:** la energía cinética se convierte en calor por fricción (sistemas antiguos; eficientes, pero con altos costos de mantenimiento);
- **comparación: frenado eléctrico x frenado mecánico:**
 - mantenimiento reducido de los elementos responsables del frenado;
 - velocidad mejor controlada durante el proceso de frenado;
 - la energía disipada en el frenado puede recogerse y devolverse a la fuente de alimentación;

La conversión de energía mecánica en energía eléctrica se puede realizar de tres formas:

- **frenado por inyección de corriente continua:**
 - disipa el calor en el rotor del motor;
 - Permite parar el motor aplicando corriente continua. La magnitud de la corriente continua que define el par de frenado y el período durante el cual se aplica son parámetros que puede especificar el usuario. Este modo generalmente se usa con cargas de baja inercia y puede causar que el motor se sobrecaliente cuando los ciclos de parada son muy repetitivos.
 - El principio básico del frenado CC es inyectar corriente CC en el estator del motor para generar un campo magnético estacionario en el motor. Esto se logra conectando dos fases del motor de inducción a una fuente de CC. La corriente inyectada debe ser al menos igual a la corriente de excitación del motor, o a la corriente en vacío del motor (antes de iniciar el frenado DC hay un “tiempo muerto”, cuando el motor gira libremente, necesario para la desmagnetización del motor Este tiempo es función de la velocidad del motor a la que se produce el frenado CC).

OBS.*El frenado en los variadores de frecuencia se realiza de la siguiente manera: la secuencia de control del variador de frecuencia se modifica de tal manera que el IGBT en una fase se apaga, mientras que las otras dos fases proporcionan una salida con una señal de corriente continua con una magnitud de control y duración de esa señal. La corriente desarrollada en el rotor tendrá amplitud y frecuencia proporcionales a la velocidad, resultando en un par de frenado proporcional a la velocidad. La energía de frenado se disipa como pérdidas en los devanados del rotor.*

- **frenado dinámico:**

- disipa el calor en una resistencia externa;
- Generalmente, el frenado dinámico se utiliza para bajar la velocidad a un valor determinado, luego de lo cual se aplica una corriente continua al motor, logrando un frenado rápido y preservando el inversor.
- Los módulos de frenado reostático son bancos de resistencias controlados electrónicamente conectados al circuito intermedio (CC), que permiten obtener hasta un par de frenado cerca del nominal del motor, asegurando la disipación de la energía de frenado en estas resistencias externas.
- en esta situación, el motor se comporta como un generador, en el que la tensión inducida en el rotor tiene una amplitud mayor que la de la fuente de alimentación. Parte de la energía se disipa en el motor y parte en el puente de los IGBT.
 - problema: una parte de esta energía regresa a través de los IGBT de salida para magnetizar el motor. De esta forma, la tensión en los condensadores aumenta hasta que se activa la protección contra sobretensiones en el enlace de CC. Por tanto, el frenado dinámico consiste en conectar una resistencia externa al inversor a través del enlace DC, de esta forma, la energía que sería devuelta al enlace se disipa en forma de calor, siendo así una solución sencilla al problema de sobretensión en el DC. enlace.

- **frenado regenerativo:**

- devuelve energía eléctrica a la fuente de alimentación (para casos en los que la potencia disipada es bastante grande);
- De manera similar al frenado de CC, cuando se produce el frenado, se requiere

un camino para que la energía fluya desde el motor hasta los diodos rectificadores de puente a través de los enlaces de CC.

➤ dos métodos:

- **puente rectificador con tiristores:** la regeneración solo será posible cambiando la polaridad del enlace de CC; esto se puede obtener a través de un interruptor entre el rectificador y el capacitor que cambiará de dirección de acuerdo con el flujo de energía (se usa en dispositivos de accionamiento donde el frenado es ocasional y el cambio no necesita ser rápido, como, por ejemplo, motores de locomotoras eléctricas)
- **puente rectificador con diodos:** un conjunto de tiristores se utiliza para extraer la potencia de frenado

OBS. *La principal desventaja del frenado regenerativo es el costo inicial en comparación con el retorno del ahorro de energía. Esta retroalimentación depende del tipo de aplicación, la inercia de la carga y la duración de frenado requerida.*

2.5.2 Solicitud en control de procesos

La precisión del sistema de control y su respuesta a la entrada del operador está determinada por el tipo de control utilizado.

- **control de lazo abierto:** en muchas aplicaciones, el convertidor de frecuencia se utiliza simplemente para controlar la velocidad de una carga en función de un punto de referencia proporcionado por un operador o un controlador de procesos (PLC). Los inversers convencionales controlan la magnitud y frecuencia de la tensión de salida, ya que la corriente que circula depende de las condiciones del motor y de la carga, es decir, no se tiene información de la velocidad actual para verificar si el motor está funcionando a la velocidad deseada.

OBS. *Este método se denomina control en lazo abierto, y es adecuado para controlar cargas que varían poco en aplicaciones más sencillas, tales como: bombas centrífugas, ventiladores, cintas transportadoras, donde los cambios de velocidad que puedan ocurrir no tengan consecuencias graves para el control del proceso.*

- **control de bucle cerrado:** en la industria existen aplicaciones críticas cuya velocidad/par debe controlarse de forma precisa y continua. Esta precisión requerida en el control es muy importante y debe tenerse en cuenta al elegir un convertidor de frecuencia.

OBS.*En el control de bucle cerrado, la velocidad/par se lee continuamente, se controla y se mantiene en el valor deseado automáticamente.*

La mayoría de los convertidores de frecuencia tienen una función de regulador PID, que se puede utilizar para controlar un proceso de circuito cerrado. Esta función desempeña el papel de un regulador proporcional, integral y derivativo, supuesto en el control de velocidad normal del inversor.

2.5.3 Solicitud en ahorro de energía

Una característica importante de la aplicación de convertidores de frecuencia es el ahorro de energía eléctrica en el proceso de control de flujo. En este tipo de aplicación es posible cambiar las características del motor ajustando la tensión y la frecuencia a valores suficientes para suplir las necesidades de potencia de la carga.

Una aplicación típica del ahorro de energía es el uso en la industria en situaciones donde los motores no funcionan a plena carga la mayor parte del tiempo, como ventiladores, bombas, compresores y otros.

- **solicitud:**

- * válvula: si el caudal es inferior al deseado, se abre la válvula para aumentar el caudal; si el caudal es mayor, la válvula se cierra – en esta aplicación tenemos un control de caudal por la pérdida de carga en la válvula, pero con velocidad constante del motor.

- * inversor: valor por debajo del deseado, se aumenta la velocidad del motor; valor por encima del deseado, se reduce la rotación del motor – de esta manera, cuando se necesita reducir la velocidad, se reduce la frecuencia y el voltaje aplicado al motor, lo que provoca una reducción significativa en el consumo del motor, y en consecuencia, una energía eléctrica ahorros.

Economía de energía: El usuario no los nota completamente, pero se destacan en aplicaciones que involucran bombas centrífugas y ventiladores, donde el par de carga aumenta con el cuadrado de la velocidad y el consumo de energía aumenta con el cubo de la velocidad.

2.6 Hipótesis general

El análisis técnico de las ventajas y desventajas de dos sistemas de arranque directo para un motor de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla fue de utilidad práctica muy significativa.

2.7 Variables

2.7.1 Independiente:

Variable X = Motor eléctrico de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla

2.7.2 Dependiente

Variable Z = Sistemas de arranque directo

2.8 Operacionalización de las Variables

VARIABLES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA O VALOR FINAL	TIPO DE VARIABLE
variable de interés: Rendimiento según tipo de arranque del Motor de inducción trifásico con rotor jaula ardilla	La relación entre la potencia mecánica de salida (w) respecto a la potencia eléctrica de entrada (w)	η (%)	Variable numérica continua
variable de caracterización: Análisis de dos sistemas de arranque directo	comparar los valores de los parámetros de las variables en toda la población (la muestra inicial) siendo la variable cuantitativa,	Pérdidas = W. I = amperios V= voltaje F = Hz.	Variable numérica continua

	comparamos las medias		
--	-----------------------	--	--

Variable	Dimensiones	Indicadores
variable independiente: Variable X = Motor eléctrico de inducción trifásico con rotor jaula de ardilla	• Torque • Potencia absorbida • Potencia desarrollada • Velocidad • eficiencia	○ N-m ○ kW ○ kW ○ RPM ○ %

Variable	Dimensiones	Indicadores
Variable Dependiente: Variable Z =. Sistemas de arranque directo	• Mayor corriente • Menor corriente • Mayor voltaje • Menor voltaje	• Amp. • Amp. • Voltaje • Voltaje

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipos de estudio y método de investigación

3.1.1. Método hipotético deductivo

Se parte de una hipótesis o explicación inicial, para luego obtener conclusiones particulares de ella, que luego son a su vez comprobadas experimentalmente.

3.2 Tipo de investigación

La investigación es básica, cualitativa, puesto que es pura o teórica, consiste en realizar un estudio con el único objetivo de obtener más información sobre determinado fenómeno, sin la intención de intervenir en el mismo.

Investigación descriptiva, Como su nombre lo indica, el tipo de investigación con metodología descriptiva busca describir un hecho u objeto de estudio a través de la indagación y análisis de la realidad.

Investigación no experimental, se mide las variables.

3.3. Población y muestra

3.3.1 Población

Los lugares donde se usan los motores de inducción de rotor jaula de ardilla y tenga cualquiera de los dos tipos de arranque (arrancador por convertidor de frecuencia ó los arrancadores suaves ó estáticos soft-starter) como fábricas, prendas de vestir, autopartes, procesamiento de los alimentos, tornería centros hospitalarios, centros de educación, edificios, etc.

3.3.2. Muestra

En el área de casa fuerza del Hospital Ramiro Priale Priale (Essalud), se encuentra un motor de inducción tipo rotor jaula de ardilla con arrancador tipo variador de velocidad y otro motor en la sección de bombeo los cuales cuentan con arrancadores del tipo soft-starter. (ver anexo 3)

3.4. Método de recolección de datos

Se tomará como base de información reportes e informes sobre los motores de inducción trifásico de rotor jaula de ardilla y el tipo de arranque que se tiene en domicilios, edificios, parques industriales, hospitales a nivel de la ciudad de Huancayo.

3.5. Instrumentos de recopilación de datos

Para la recopilación de datos se usaron útiles de oficina.

3.6. Procesamiento de datos

Los datos serán procesados en hojas de cálculo.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Comparación entre aplicaciones de convertidores de frecuencia y arrancadores estáticos (soft-starter)

Como se mencionó anteriormente, hay varias opciones para los arrancadores de motor. Dos de ellos, los arrancadores convertidores de frecuencia y los arrancadores estáticos soft-starter, merecen especial atención por tener características muy similares. Los términos y descripciones utilizados en la literatura sobre estos productos son casi los mismos, al igual que la lista de posibles aplicaciones. Sin embargo, la tecnología y el rendimiento son significativamente diferentes.

El propósito de este capítulo es proporcionar información técnica básica para comprender estas diferencias. Hablaremos sobre el perfil de algunas cargas que utilizan estos métodos de arranque, además de presentar una cotización de algunos de estos equipos. Con esto, esperamos ratificar lo importante que es elegir el equipo adecuado para cada aplicación.

Cuando se entiendan estas diferencias, será más fácil saber cuándo y dónde elegir cada una de estas tecnologías.

4.2. Cargas típicas impulsadas por convertidores de frecuencia y arrancadores suaves

Para el uso de motores eléctricos de inducción de rotor de jaula de ardilla para el accionamiento de cargas, se deben tener en cuenta las características de la carga accionada tanto para accionamientos con el motor funcionando a velocidad fija, como para velocidad variable, ya que, dependiendo de las características de arranque, continua o transitoria, es que se puede realizar el correcto dimensionamiento del motor.

Para las aplicaciones aquí ilustradas, se tuvo en cuenta la activación de la carga a través de dichos motores con variadores de frecuencia y arrancadores suaves estáticos, determinando sus ventajas y limitaciones:

- **ventiladores y turbobombas:** presentan un par cuadrático, es decir, su par resistente varía con el cuadrado de la rotación aplicada. Por ejemplo, si se duplica la rotación de la bomba para aumentar la presión del sistema hidráulico, se debe suministrar un par cuatro veces mayor para este propósito.

- **torno de superficie/laminador deshojador:** Esta aplicación tiene la característica de tener un torque del tipo que varía inversamente con la rotación (hiperbólico), ya que en el proceso se debe obedecer la condición de que la velocidad tangencial de la pieza o cilindro sea siempre constante, es decir, la velocidad superficial entre la pieza y la herramienta de corte tiene que ser constante.
- **sistemas de transporte:** esta familia de aplicaciones incluye cintas transportadoras, correas, tornillos, cadenas, mesas transportadoras, etc. Estas aplicaciones se pueden agrupar porque tienen las mismas características en cuanto a su activación, con un par resistente constante para todo el rango de velocidades. Se debe tener especial cuidado en condiciones donde sea necesario operar con velocidades por debajo de la mitad de la velocidad nominal del motor accionado, donde se debe considerar el problema de sobrecalentamiento por reducción de ventilación para motores convencionales.
- **extrusoras:** estas máquinas cuentan con par resistivo de tipo constante para cualquier velocidad. Nuevamente, se debe tener especial cuidado en las condiciones en las que es necesario operar a velocidades por debajo de la mitad de la velocidad nominal del motor, donde se debe considerar el problema del sobrecalentamiento debido a la ventilación reducida para los motores convencionales. Este problema se puede evitar sobredimensionando la estructura del motor o usando ventilación forzada.
- **Trefilar:** para este tipo de equipos, la característica de par es constante para cualquier valor de velocidad, y se debe prestar atención a la operación a bajas velocidades con sobredimensionamiento del motor, como se describió anteriormente. Otro factor importante es la condición de sobrecarga en el arranque al introducir el material a estirar, lo que debe ser previsto al dimensionar el método de arranque.
- **fresadoras:** Esta aplicación se caracteriza por la necesidad de mantener constante la velocidad de desbaste (arranque de material) (velocidad superficial de la muela abrasiva constante). Para ello, es interesante poder aumentar la velocidad de la muela en función de su desgaste. En esta condición, cuando la rueda es nueva, la velocidad requerida es baja y el par es alto.
- **sistemas de dosificación:** Se entiende por sistemas de dosificación aquellas aplicaciones en las que se utilizan convertidores de frecuencia para variar el giro del motor encargado de alimentar el sistema, en procesos continuos y que no implican un control preciso de cantidad, volumen o caudal. Tenemos como ejemplo aplicaciones como: esteras, tornillo sinfín y bombas.

- **centrífugas:** Son equipos utilizados para separar compuestos de diversa naturaleza. Entre estos equipos podemos destacar las centrífugas para azúcar, ropa, productos químicos, etc. Este tipo de aplicación presenta un par resistivo bajo y una inercia extremadamente alta.
- **molinos de tambor:** entre los tipos de molinos de tambor destacan los molinos de bolas (industria cerámica). Y por analogía del principio de funcionamiento, son aplicaciones similares a las lavadoras industriales. Este tipo de aplicación tiene una característica de par que varía linealmente con la rotación, es decir, cuanto mayor es la rotación, mayor es el par resistente. Este sistema tiene una alta inercia de arranque que depende directamente de la cantidad de carga en el molino.

4.3 Cotización

Para ilustrar lo costoso que puede resultar para un proyecto la aplicación indebida de uno de estos equipos, a continuación, se cotizan algunos de estos equipos, con sus respectivas características eléctricas, de potencia y aplicaciones similares.

Tabla 4.1 Características y cotización de arrancadores soft-starter

Equipamiento	Soft-starter
Fabricante	Schneider-Electric
Línea	Altistar 01
Aplicación	Comprensora, bombas, ventiladoras, etc.
Tensión (Voltios)	110 - 480
Potencia (kW)	0,37 - 15
Frecuencia (Hz)	50/60
Precio (USD)	111.182 – 226.594
Equipamiento	Soft-starter
Fabricante	Schneider-Electric
Línea	Altistar 22
Aplicación	Comprensora, bombas, ventiladoras, etc.
Tensión (Voltios)	230 - 440
Potencia (kW)	4 - 400
Frecuencia (Hz)	50/60
Precio (USD)	660.638 – 6,173.78
Equipamiento	Soft-starter
Fabricante	Schneider-Electric
Línea	Altistar 48
Aplicación	Ventiladoras de alta inercia, agitadores, misturadores etc.
Tensión (Voltios)	230 - 440
Potencia (kW)	4 - 400
Frecuencia (Hz)	50/60
Precio (USD)	1,021.5 – 12,082

Además de los arrancadores suaves de la línea Altistart, también se cotizó algunos convertidores de frecuencia de la línea Altivar (que se muestran a continuación).

Tabla 4.2 Características y cotización de arrancadores inversores de frecuencia

Equipamiento	Inversor de frecuencia
Fabricante	Schneider-Electric
Línea	Altivar 12
Aplicación	Maipulación de cargas, mezcladoras Industriales, etc.
Tensión (Voltios)	200 - 240
Potencia (kW)	0,18 - 4
Frecuencia (Hz)	50/60
Precio (USD)	230.798 – 682.506
Equipamiento	Inversor de frecuencia
Fabricante	Schneider-Electric
Línea	Altivar 312
Aplicación	Ascensores, puentes grúa, máquinas textiles, etc.
Tensión (Voltios)	380 - 500
Potencia (kW)	0,18 - 4
Frecuencia (Hz)	50/60
Precio (USD)	230.8 – 2,080
Equipamiento	Inversor de frecuencia
Fabricante	Schneider-Electric
Línea	Altivar 61
Aplicación	Comprensora, bombas, ventiladoras, etc.
Tensión (Voltios)	380 - 480
Potencia (kW)	0,37- 630
Frecuencia (Hz)	50/60
Precio (USD)	987.94 – 48,567
	987.95

Estudios para la aplicación de métodos de arranque

Se elabora cuatro ejemplos de aplicación (dos referentes a bombas y dos referentes a transportadores). Estos ejemplos no requieren velocidad variable o regulación de velocidad fina, por lo que se puede usar un variador de frecuencia variable o un arrancador estático de arranque suave.

Ejemplo 1 -Una bomba está arrancando a pleno voltaje. Hay un “golpe de ariete” y el apuntalamiento de la tubería necesita un mantenimiento constante.

Respuesta: Un arrancador suave (**arrancadores estáticos soft-starter**) se adaptará mejor a la aplicación, ya que proporciona un par controlado durante la aceleración y se utiliza para minimizar y, en muchos casos, eliminar el "golpe de ariete". No hay preocupaciones con respecto a las limitaciones de corriente ya que la aplicación se inicia a pleno voltaje.

Ejemplo 2 -Un transportador terrestre necesita un 100% de torque para acelerar cuando está completamente cargado. El consumo máximo de corriente de la red está limitado al 500 % de la corriente a plena carga del motor. Normalmente, el transportador comenzará sin carga, sin embargo, en algunos casos, puede ser necesario que este transportador comience con una carga.

OBS. *La tasa de aceleración es crucial para evitar daños en la correa.*

Respuesta: Inicialmente, un arranque suave (**arrancadores estáticos soft-starter**) parece la elección correcta. El arrancador suave puede proporcionar un 101 % de par a un 450 % de corriente. Sin embargo, la tasa de aceleración, que es igual al tiempo de inicio, es crítica. La carga también varía de descargada a completamente cargada. En este caso, un convertidor de frecuencia sería la solución correcta.

Ejemplo 3 -Se está instalando una nueva bomba de riego en una zona rural. Debido a esto, el consumo máximo de corriente de la red sin una caída de voltaje significativa se ha calculado al 200 % de la lectura de la placa de identificación del motor.

Respuesta: Un **arrancador convertidor de frecuencia es mejor que un arrancador suave (arrancadores estáticos soft-starter)**. En algunos casos, los arrancadores suaves pueden acelerar la bomba con solo un 200 % de corriente. La experiencia de aplicación indica que a menudo se requiere de 250 a 300% de corriente. **El arrancador convertidor de frecuencia** puede suministrar el par necesario para acelerar la bomba dentro de las restricciones de límite de corriente del sistema de distribución.

Ejemplo 4 -Un motor de 20 HP impulsa un transportador aéreo a través de un engranaje que arranca y se detiene con frecuencia. Se puede usar un arranque de voltaje completo, pero si el transportador arranca demasiado rápido, el producto se tambaleará y podría dañarse o la cadena podría romperse.

Respuesta: Un arranque suave (**arrancadores estáticos soft-starter**) se adaptaría a esta aplicación. No hay restricción de tiempo ni limitación de corriente. Se debe usar el arranque en rampa para permitir pequeñas variaciones en la carga que se refleja en el motor. Si la reducción de engranajes es lo suficientemente alta, un inicio con límite de corriente puede proporcionar un inicio aún más suave.

Estos ejemplos muestran cómo las variaciones sutiles de la aplicación pueden cambiar el tipo de arrancador de motor requerido. Cada aplicación debe ser evaluada de acuerdo a sus propias particularidades. Ni los variadores de frecuencia ni los arrancadores suaves estáticos son soluciones adecuadas para cualquier situación.

4.4. Discusión de los resultados

En aplicaciones donde el tiempo de aceleración debe ser constante, se debe usar **arrancador convertidor de frecuencia**, ya que el tiempo de aceleración para un arranque suave (**arrancadores estáticos soft-starter**) depende más de la carga que el tiempo seleccionado para la aceleración. Si el tiempo de aceleración no es un problema y lo que se requiere es control de par y corriente, un arrancador suave es una buena opción para la aplicación. (NOTA: algunos arrancadores estáticos soft-starter usan retroalimentación, por ejemplo, tacómetros. Estas unidades pueden proporcionar aceleración cronometrada con cargas variables. Debe tenerse en cuenta que la retroalimentación de corriente durante la aceleración puede alcanzar el mismo nivel que con el voltaje de arranque completo: 600 a 800 % de la corriente de carga completa).

Con respecto a la parada, un variador de frecuencia llevará el motor al reposo en un tiempo específico. Puede incorporarse a un arrancador convertidor de frecuencia o bien solicitarse una función de frenado dinámico opcional para cargas de alta inercia o que provoquen regeneración. El arranque suave con una función de parada suave solo puede extender el tiempo de parada. Además, al igual que la aceleración, el tiempo de parada depende de la carga. Si las características de temporización y parada no son críticas, un arranque suave puede ser adecuado para la aplicación. Algunos arrancadores suaves especialmente diseñados también pueden proporcionar frenado. Estos tipos de arrancadores están

diseñados para reducir el tiempo de parada cuando la inercia es demasiado larga. Si la carga no es pura inercia y puede variar, el tiempo de parada también variará.

Cuando la limitación de corriente es la principal razón para no arrancar a plena tensión, el primer método a considerar hoy suele ser el arranque suave. Esto se debe a la diferencia de costo entre los arrancadores suaves y un convertidor de frecuencia en los rangos de corriente donde la limitación de corriente se convierte en un factor. En muchos casos, el arranque suave es una opción adecuada.

Hay aplicaciones donde el costo adicional de un inversor es apropiado, por ejemplo, cuando el motor no puede proporcionar suficiente par para arrancar la carga con las limitaciones de corriente impuestas por el sistema de distribución. A diferencia de los arrancadores suaves, los variadores pueden acelerar un motor a la velocidad máxima con un par nominal sin que la corriente de línea supere la corriente de arranque.

carga completa del motor. Recuerde que la potencia de entrada al variador es igual a la potencia de salida más las pérdidas. Por lo tanto, para cargas que requieran un par superior al que puede proporcionar el arrancador suave con los límites impuestos por la distribución del sistema, un inversor puede ser la solución necesaria.

Ahora, si el par de arranque es una preocupación al seleccionar un variador o un arrancador, considere la drástica diferencia en la cantidad de par que puede desarrollar una cantidad dada de corriente de línea. El inversor tiene un par por amperio mucho mayor.

Dicho esto, es claro que técnicamente el arrancador convertidor de frecuencia presenta más posibilidades que los arrancadores suaves (arrancadores estáticos soft-starter), sin embargo, debido a su alto costo, su “sobredimensionamiento” puede recargar demasiado el costo de un proyecto.

CONCLUSIONES

1. Los arrancadores convertidores de frecuencia y los arrancadores suaves son dispositivos con diferentes estructuras y funcionalidades. Mientras que el inversor está diseñado para controlar la velocidad y el par del motor a lo largo de su funcionamiento, el arrancador suave solo puede controlar su arranque y frenado. Es un hecho que, para motores pequeños (menos de 2.2 kW.), un convertidor de frecuencia puede incluso tener un coste similar al de un arrancador suave y, por tanto, resultar una ventaja ya que también puede ofrecer rampa de arranque y frenado. Esta relación, sin embargo, desaparece cuando se trata de motores de mayor potencia (por ejemplo, comparando el precio de un arrancador suave con una potencia de 50 hp y un variador de frecuencia de la misma potencia).
2. Al conocer los principios de funcionamiento del variador de frecuencia y el arrancador estático, y el desempeño del motor con cada uno de estos recursos, se hace evidente la aplicabilidad similar de ambos equipos. Aun así, los convertidores de frecuencia tienen mayores ventajas técnicas.
3. De estas ventajas, la primera y más obvia es cuando la velocidad del motor debe cambiarse de cero a la frecuencia de línea y, en ocasiones, exceder la frecuencia de línea. El arrancador suave aplica voltaje y, por lo tanto, la velocidad de funcionamiento es fija. La segunda ventaja, relacionada con la velocidad que tiene el inversor, se refiere a procesos que requieren una velocidad constante. Si se aplica una frecuencia fija al motor, la velocidad real de ese motor no se rige con precisión por la frecuencia de entrada. La velocidad de salida en realidad está regulada por la carga aplicada al motor. Por lo tanto, si un proceso requiere una regulación de velocidad muy estricta, la frecuencia aplicada al motor debe cambiarse en relación con la carga que se está aplicando.

RECOMENDACIONES

1. Como sugerencia de trabajo futuro, vale la pena investigar junto con los fabricantes de convertidores de frecuencia cuáles son sus propuestas para el desarrollo de equipos como el control vectorial de flujo y el control orientado a campo, o incluso medir los esfuerzos que se están empleando para el desarrollo de más equipos eficientes (con mejor factor de potencia y menor potencial para generar distorsiones armónicas).

BIBLIOGRAFÍA

- 1.A., B., & vodovozov , v. (2012). *topical problems in the field of electrical and power Engineering* . Estonia.
2. Clayton. (2012). *Electric Drives*.
3. Druves, A., & Bradley, A. (2010). *Construcción electronica de un convertidor de frecuencia*.
- 4.Handbook, A. (2010). *topologias y uso*. bergamo.
- 5.Jordan, h. E. (1994). *Energy - Efficient motors and their applications*. NEW YORK.
- 6.Mangonon, P. (2010). *Máquinas estáticas y Dinámicas: Selección y Diseño*. Mexico: 1ra edición prendice hall.
- 7.OSE. (2007). Arranque suave con el arrancador Soft starter. 35.
- 8.OSE. (2007). Arranque suave con el soft-start insertado en el delta del motor. 36.
- 9.Rashid. (2010). *Power Electronics*.
- 10.S., S. A., & Smith, K. (2013). *circuitos microelectronicos* . mcgraw book company.
11. Sacchi, J. N., & Ricaldi, A. (1997). *calculo y diseño de maquinas electricas* .
12. WEG. (2004). *curvas caracteristicas*.
13. WEG. (2008). *Guías de aplicación de arrancadores suaves*.
14. WEG. (2010). *Guia de aplicación de convertidores de frecuencia*.
- 15.WEG. (s.f.). *Guia de aplicación de arrancadores suaves*.
- 16.Y.V., S. (2007). *Improving asynchronous electric drives of machines with a periodically varying load*. RUSIA.

ANEXOS

ANEXO 1

Número de modelo y parámetros del arrancador soft-starter

Número de modelo	Mismo modelo	Potencia nominal	Corriente nominal	Peso
SR8-3011	FKR1-3011	11kw	23A	4kg
SR8-3015	FKR1-3015	15kw	30A	4kg
SR8-3018	FKR1-3018	18kw	37A	4kg
SR8-3022	FKR1-3022	22kw	43A	4kg
SR8-3030	FKR1-3030	30kw	60A	4kg
SR8-3037	FKR1-3037	37kw	75A	4kg
SR8-3045	FKR1-3045	45kw	90A	4kg
SR8-3055	FKR1-3055	55kw	110A	4kg
SR8-3075	FKR1-3075	75kw	150A	19.5kg
SR8-3090	FKR1-3090	90kw	180A	19.5kg
SR8-3115	FKR1-3115	115kw	230A	19.5kg
SR8-3132	FKR1-3132	132kw	264A	19.5kg
SR8-3160	FKR1-3160	160kw	320A	19.5kg
SR8-3200	FKR1-3200	200kw	400A	24kg
SR8-3220	FKR1-3220	220kw		24kg
SR8-3250	FKR1-3250	250kw	500A	24kg
SR8-3260	FKR1-3260	260kw		24kg
SR8-3280	FKR1-3280	280kw		24kg
SR8-3320	FKR1-3320	320kw	640A	24kg

ANEXO 2

SR8-3280 280kW; soft-starter para motores asíncronos trifásicos



ANEXO 3

Sección de bombeo del Hospital Ramiro Priale Priale (Essalud),

