



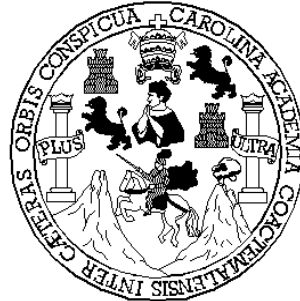
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**REDUCCIÓN DE CORRIENTE DE ARRANQUE EN MOTORES ELÉCTRICOS
Y SU APLICACIÓN EN EL AHORRO DE ENERGÍA EN UNA PLANTA
DESTILADORA DE ALCOHOL**

CARLOS BLADIMIR ECHEVERRÍA ECHEVERRÍA
Asesor Ing. Carlos Antonio Chicoj

Guatemala, abril de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REDUCCIÓN DE CORRIENTE DE ARRANQUE EN MOTORES ELÉCTRICOS
Y SU APLICACIÓN EN EL AHORRO DE ENERGÍA EN UNA PLANTA
DESTILADORA DE ALCOHOL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

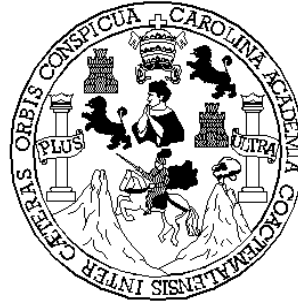
CARLOS BLADIMIR ECHEVERRÍA ECHEVERRÍA
ASESOR ING. CARLOS ANTONIO CHICOJ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramírez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

REDUCCIÓN DE CORRIENTE DE ARRANQUE EN MOTORES ELÉCTRICOS Y SU APLICACIÓN EN EL AHORRO DE ENERGÍA EN UNA PLANTA DESTILADORA DE ALCOHOL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 20 de mayo de 2004.

Carlos Bladimir Echeverría Echeverría

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería, en especial a la Escuela de Mecánica Eléctrica, por todos los conocimientos adquiridos a lo largo de mi vida universitaria.

A mis compañeros y amigos de la “U”, por todos los consejos, explicaciones y chivos, que en su momento, me salvaron la vida. En especial a Erwin Pacheco “Chapu” y Rogelio Guzmán por su valiosa ayuda en el desarrollo de este trabajo.

A mi asesor Ing. Carlos Antonio Chicoj por los consejos y ayuda en la revisión de este trabajo.

A todas las personas que de alguna forma contribuyeron a la realización de este trabajo de graduación, en especial al Lic. Ricardo Kreitz y a mi tío José Antonio Durán.

ACTO QUE DEDICO

A DIOS

Que me dio la vida y fortaleza para finalizar mi carrera.

A MIS PADRES

Carlos Enrique y Alicia Yolanda, como un mínimo homenaje a su amor y esfuerzo incondicional durante cada minuto de mi vida.

A MI HERMANA

Claudia Carolina, por ser un gran apoyo y saber escucharme y alentarme.

A MI NOVIA

Aura Estela, luz de mi vida y parte fundamental de mi existencia que me motiva a ser cada día mejor.

A MI FAMILIA

Por ayudarme a crecer y estar siempre pendientes de mí, a los que hoy me acompañan, así como a los que me cuidan desde el cielo.

A MIS AMIGOS

Con los cuales pasé muy gratos momentos.

INDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MEDICIÓN Y COSTOS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Ley general de electricidad	2
1.3 Obligaciones del usuario de energía eléctrica	3
1.3.1 Distorsión armónica	4
1.3.2 <i>Flicker</i>	4
1.3.3 Factor de potencia	5
1.3.4 Variación de la potencia contratada	5
1.4 ¿Qué es la demanda eléctrica?	6
1.5 ¿Por qué se mide la demanda?	6
1.6 Método de medición de la demanda	7
1.6.1 El demandómetro	8
1.6.1.1 Demandómetro electromecánico	9
1.6.1.2 Demandómetro electrónico	11
1.7. ¿Cómo se calcula una factura eléctrica industrial?	12
1.7.1 Cargos por energía consumida	12
1.7.2 Cargos por potencia contratada	13
1.7.3 Cargos por penalizaciones de incumplimiento a las NSTD	13

1.7.3.1	Cargos por factor de potencia	14
1.7.3.2	Cargos por exceso de demanda	14
1.8	Detalle de la factura eléctrica	14
1.8.1	Generación y transporte (cobro por cuenta de terceros)	15
1.8.2	Distribución	15
1.8.3	Penalización por incumplimiento NTSD	16
1.9	Efectos de la demanda en la facturación eléctrica	16
2.	CORRIENTES DE ARRANQUE EN MOTORES ELÉCTRICOS	17
2.1	Arranque de motores	17
2.2	Corriente de arranque	19
2.3	Tipos de corriente de arranque	20
2.3.1	Corriente de irrupción	20
2.3.2	Corriente de rotor bloqueado	20
2.4	Efectos de la corriente de arranque	22
2.4.1	Dispositivos de control	23
2.4.2	Caída de tensión en la instalación	24
2.4.3	Sobrecalentamiento de motores	24
2.4.4	Distorsión de energía en la instalación	25
2.4.5	Daño a cargas mecánicas conectadas al motor	26
2.4.6	Elevación de los costos de la energía eléctrica	27
3.	MÉTODOS DE ARRANQUE DE MOTORES ELÉCTRICOS	29
3.1	Antecedentes	29
3.2	Tipos de arranque	30
3.2.1	Arranque directo	31
3.2.1.1	Dispositivo	32
3.2.1.2	Curva de corriente de arranque	36

3.2.1.3	Ventajas	37
3.2.1.4	Desventajas	37
3.2.2	Arranque a voltaje reducido	38
3.2.2.1	Arranque estrella-delta	38
3.2.2.1.1	Dispositivo	40
3.2.2.1.2	Curva de corriente de arranque	45
3.2.2.1.3	Ventajas	47
3.2.2.1.4	Desventajas	48
3.2.2.2	Arranque por autotransformador	49
3.2.2.2.1	Dispositivo	51
3.2.2.2.2	Curva de corriente de arranque	53
3.2.2.2.3	Ventajas	53
3.2.2.2.4	Desventajas	54
3.2.2.3	Arranque suave	55
3.2.2.3.1	Dispositivo	56
3.2.2.3.1.1	Módulo de control	58
3.2.2.3.1.2	Módulo de potencia	59
3.2.2.3.2	Modos de operación	60
3.2.2.3.2.1	Arranque suave	61
3.2.2.3.2.2	Corriente limitada	61
3.2.2.3.2.3	Voltaje pleno	62
3.2.2.3.2.4	Doble rampa	63
3.2.2.3.2.5	Arranque <i>kickstart</i>	64
3.2.2.3.2.6	Paro suave	66
3.2.2.3.3	Curva de corriente de arranque	67
3.2.2.3.4	Ventajas	68
3.2.2.3.5	Desventajas	70
3.3	Comparación	71
3.4	Aplicaciones	73

3.4.1 Bombas	73
3.4.2 Bandas transportadoras	74
3.4.3 Compresores	74
4. ANÁLISIS Y ESTUDIO EN LA DESTILADORA DE ALCOHOLES Y RONES SOCIEDAD ANÓNIMA	77
4.1 Antecedentes	77
4.2 Proceso de elaboración de alcoholes	78
4.3 Área de materias primas	80
4.4 Configuración actual	82
4.5 Cálculos	83
4.5.1 Cálculos con arrancador directo	89
4.5.1 Cálculos con arrancador estrella-delta	91
4.5.2 Cálculos con arrancador autotransformador	95
4.5.3 Cálculos con arranque suave	99
4.6 Comparación de resultados	102
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Esquema de un medidor de energía electromecánico	9
2	Curva de corriente contra tiempo en el arranque de un motor eléctrico	21
3	Arrancador electromagnético de norma NEMA	33
4	Circuito de potencia del arranque directo de motores trifásicos	35
5	Curva de corriente contra velocidad del arranque directo	36
6	Circuito de potencia de un arrancador estrella-delta con transición abierta	41
7	Circuito de mando de un arrancador estrella-delta con transición abierta	42
8	Panel de un arrancador estrella-delta con transición abierta	43
9	Circuito de potencia del arranque estrella-delta con transición cerrada	44
10	Curva de corriente contra velocidad del arranque estrella-delta con transición abierta	46
11	Curva de corriente contra velocidad del arranque estrella-delta con transición cerrada	47
12	Panel de un arranque por autotransformador	50
13	Circuito de potencia del arranque por autotransformador	52
14	Curva de corriente contra velocidad del arranque por autotransformador con tap al 65 por ciento.	53
15	Arrancador suave	55
16	Circuito de potencia simplificado del arranque suave con conexión directa	56

17	Circuito de potencia simplificado del arranque suave con conexión dentro de la delta	58
18	Configuración de un arreglo de 2 tiristores SCR y sus estados de conducción en una línea de dos hilos AC	60
19	Característica del modo de arranque suave	61
20	Característica del modo de arranque con corriente limitada	62
21	Característica del modo de arranque a voltaje pleno	63
22	Característica del modo de arranque a doble rampa	64
23	Característica del arranque suave con <i>kickstart</i>	65
24	Característica del paro suave	66
25	Curva de corriente contra velocidad del arranque suave con corriente limitada	67
26	Comparación de corriente de arranque con distintos arrancadores	72
27	Esquema del área de materias primas de DARSA	81

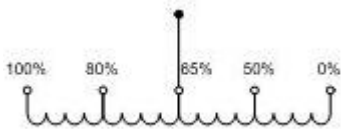
TABLAS

I	Clasificación NEMA de arrancadores electromagnéticos	34
II	Relación entre el voltaje aplicado a las terminales del motor y la corriente para diferentes tipos de arranque	51
III	Características de los motores instalados en las bombas de melaza del área de materias primas	80
IV	Características de los motores instalados en las bombas de fermentación del área de materias primas	82
V	Datos de los motores de las bombas de fermentación	84
VI	Mediciones con arrancador electromagnético en el motor BF01	89
VII	Resumen de costos de un arrancador directo	91
VIII	Mediciones con arrancador estrella-delta en el motor BM02	92
XI	Resumen de costos de un arrancador estrella-delta	95
X	Mediciones con arrancador autotransformador en el motor BM02	96
XI	Resumen de costos de un arrancador por autotransformador	99
XII	Mediciones con arrancador suave en el motor BM02	100
XIII	Resumen de costos de un arrancador suave	102
XIV	Comparación de parámetros con los distintos arrancadores en el motor BM02	103

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amperio. Unidad de medida de la intensidad de corriente eléctrica del Sistema Internacional.
hp	<i>Horsepower</i> . Medida de potencia que equivale a 746 vatios.
kW	Kilovatio. Unidad de medida de la potencia eléctrica del Sistema Internacional equivalente a 1,000 vatios.
Q.	Quetzal. Moneda oficial de la República de Guatemala.
RPM	Revoluciones por minuto. Medida de la velocidad de rotación de un motor.
T1	Terminal de entrada número uno de un motor eléctrico.
T2	Terminal de entrada número dos de un motor eléctrico.
T3	Terminal de entrada número tres de un motor eléctrico.
T4	Terminal de entrada número cuatro de un motor eléctrico.

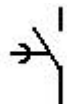
- T5** Terminal de entrada número cinco de un motor eléctrico.
- T6** Terminal de entrada número seis de un motor eléctrico.
- V** Voltio. Unidad de medida de tensión eléctrica y fuerza electromotriz del Sistema Internacional.
- W** Vatio. Unidad de medida de la potencia eléctrica del Sistema Internacional.



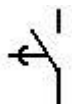
Autotransformador



Bomba Hidráulica



Condición de apertura de un contacto normalmente abierto de un relé de tiempo.



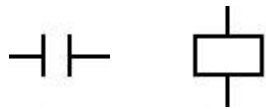
Condición de apertura de un contacto normalmente abierto de un relé de tiempo.



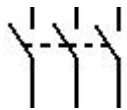
Contacto normalmente abierto



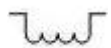
Contacto normalmente cerrado



Contactador



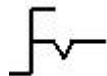
Contactador trifásico



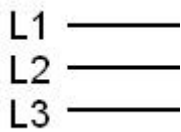
Devanado de un motor eléctrico



Fusible



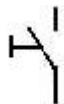
Interruptor



Líneas de alimentación



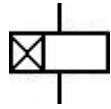
Motor eléctrico



Pulsador normalmente abierto



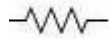
Pulsador normalmente cerrado



Relé de tiempo



Relé térmico



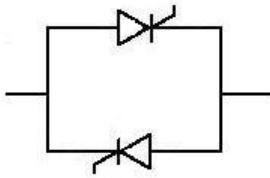
Resistencia eléctrica



Tierra o neutro



Tiristor SCR



Tiristores SCR en oposición

GLOSARIO

AC	Corriente alterna, es aquella que cambia de polaridad con respecto a su neutro. En un semiciclo es positiva, y en el otro semiciclo es negativa.
Armónica	En una onda periódica, cualquiera de sus componentes sinusoidales, cuya frecuencia sea un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.
Autotransformador	Transformador eléctrico de un solo devanado el cual actúa simultáneamente como devanado primario y como devanado secundario.
Bypass	Puente, desvío o derivación, que conecta dos puntos de un circuito eléctrico en una vía complementaria a la principal.
Cavitación	Formación de burbujas de vapor o de gas en el seno de un líquido, causada por las variaciones que éste experimenta en su presión.
Conmutación	Alternancia del estado de encendido o apagado en un dispositivo.
Contactador	Interruptor operado eléctricamente y usado en los circuitos de control en donde circulan corrientes de gran amperaje.

Corriente de falla	Corriente que puede fluir en un circuito, como resultado de un cortocircuito indeseado.
Demandómetro	Aparato de medición que se utiliza para registrar el nivel de demanda eléctrica máxima dentro de un período de tiempo en una instalación.
Devanado	Componente de un circuito eléctrico formado por un alambre aislado que se arrolla alrededor de un núcleo.
Efecto Joule	Calentamiento que se produce en un conductor por el cual circula una corriente eléctrica debido a las colisiones de electrones.
Estator	Parte fija de un motor dentro de la cual gira el rotor o eje.
Fatiga metálica	Se produce en los metales cuando están sometidos a un uso excesivo, mucha presión o mucha tensión, debilitándose y provocando ablandamiento o fallo, con el resultado de una súbita quiebra del componente.
<i>Flip-On</i>	Dispositivo que automáticamente interrumpe la corriente eléctrica cuando ésta sobrepasa su valor nominal.

hp	<i>Horsepower</i> . Unidad de medida de potencia del Sistema Internacional.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> , es la Comisión Internacional de Electrotécnica, la cual desarrolla normas y estándares de equipo eléctrico y electrónico a nivel europeo.
Impedancia	Oposición que presenta un componente o sistema al paso de corriente alterna.
Inercia	Propiedad de los cuerpos de no modificar su estado de reposo o movimiento si no es por la acción de una fuerza.
Kickstart	Arranque súbito o de golpe de un motor eléctrico.
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> , es la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de los Estados Unidos de América, la cual desarrolla normas y estándares del equipo eléctrico.
Par	Es la fuerza desarrollada por un motor durante la rotación.
pH	Índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución. Entre 0 y 7 la disolución es ácida, y de 7 a 14 la solución es básica.

PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> , Controlador Lógico Programable, es una herramienta que facilita la automatización de procesos industriales por medio de microprocesadores.
Relé	Dispositivo destinado a producir una modificación en un circuito cuando se cumplen determinadas condiciones.
Rotor	Parte giratoria principal de un motor.
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i> . Rectificador controlado de silicio (ver tiristor SCR).
<i>Sprocket</i>	Rueda dentada que transmite la potencia del eje en una cadena de transmisión.
Tap	Derivación en una sección de un devanado de un transformador eléctrico.
Tiristor SCR	Tiristor Rectificador Controlado de Silicio. Dispositivo empleado en electrónica de potencia como un conmutador, el cual posee tres terminales: ánodo, cátodo y puerta. El dispositivo funciona como un rectificador cuando recibe un pulso en la puerta.
Transitorio	Perturbación de un semiciclo de la onda de corriente alterna que es evidenciada por una breve y aguda discontinuidad de la forma de onda.

Vatio Unidad de medida de la potencia eléctrica del Sistema Internacional, su símbolo es W.

Velocidad de sincronismo

Velocidad del campo magnético giratorio dentro de un motor trifásico de corriente alterna.

Velocidad nominal

Es la velocidad que desarrolla un motor en condiciones normales de funcionamiento.

RESUMEN

Los motores eléctricos cuando se arrancan consumen una gran cantidad de corriente durante el período de aceleración desde el reposo hasta su velocidad nominal. Esta corriente, llamada corriente de arranque, puede llegar a ser hasta 8 veces el valor de la corriente nominal del motor, y podría generar efectos adversos en la instalación, como caída de tensión en la red, sobrecalentamiento de motores, daño a las cargas mecánicas en el eje del motor, elevación del registro de demanda máxima en la instalación, entre otros. Sin embargo, tales efectos se pueden reducir con la instalación de un arrancador adecuado.

Los tipos de arrancador más utilizados en la industria son los arrancadores estrella-delta, los arrancadores por autotransformador y los arrancadores suaves; cada uno posee sus propias ventajas y desventajas.

El arrancador suave tiene la característica de que puede ser configurado según el requerimiento de la aplicación que se trate y cuenta con diferentes modos de operación, como arranque con corriente limitada, doble rampa y voltaje pleno, entre otros.

La reducción de corriente de arranque de motores eléctricos por medio de arrancadores puede significar una oportunidad de ahorro económico muy rentable, ya que de esta manera se controla la demanda eléctrica de los motores y se reduce la potencia máxima consumida en la instalación, según se indicó en el caso práctico de la empresa DARSA.

OBJETIVOS

General

Conocer y profundizar sobre las corrientes de arranque de motores eléctricos, destacando los problemas que tales corrientes pueden llegar a generar en la industria que utiliza este tipo de dispositivos eléctricos, para lo cual se analizan las principales opciones que se ofrecen en el mercado para solucionar los problemas causados cuando estas corrientes de arranque son muy altas.

Específicos

1. Exponer la problemática de las altas corrientes de arranque de los motores eléctricos en la industria y describir las implicaciones económicas que éstas generan, con lo cual se establece la importancia que tiene la utilización de dispositivos arrancadores como mecanismo de solución parcial de tal problemática.
2. Conocer la forma en que un demandómetro registra las corrientes de arranque, las cuales pueden llegar a aumentar el valor de demanda máxima en una instalación, y las implicaciones que de ello se derivan.
3. Describir la forma en que se calcula la factura eléctrica industrial a fin de encontrar la solución más eficiente para el problema que implica el arranque de motores eléctricos y obtener un ahorro por este concepto.

4. Definir la variedad de dispositivos arrancadores para motores eléctricos y sus características, a fin de seleccionar el más adecuado para cada tipo de motor.

INTRODUCCIÓN

Cuando se energiza un dispositivo reactivo, como un motor, el único limitador de la corriente inicial es su componente resistiva en serie. Esto crea una impedancia inicial muy baja por uno o varios ciclos de AC. Durante el proceso de arranque, estas cargas momentáneas de baja impedancia crean grandes picos de corriente.

Las altas corrientes de arranque en motores eléctricos generan problemas en la facturación del servicio eléctrico de la industria que utiliza este tipo de máquinas. Debido a que estas corrientes generalmente son del orden de 6 a 8 veces la corriente nominal del motor, son percibidas por los medidores de demanda de la empresa eléctrica, y por tanto, registran esos períodos de arranque como períodos de alta demanda.

Con las regulaciones impuestas por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, la industria se ve afectada con la medición de la demanda, la cual se basa en qué tanta energía se consume en un período dado de tiempo. La demanda se mide en kilovatios y determina qué tanto equipo de la empresa distribuidora de energía eléctrica debe trabajar en términos de generadores, transformadores y transporte, para satisfacer los requerimientos del cliente. La demanda refleja el requerimiento máximo de energía de una instalación.

En consecuencia es necesario encontrar un método de reducción de las corrientes de arranque de los motores para evitar que éstas se eleven demasiado y lograr la reducción de la demanda eléctrica de la instalación, y por ende reducir el costo de la factura eléctrica.

Inicialmente se consideró importante presentar los principales factores que se toman en cuenta para la formulación de la factura eléctrica industrial. Así mismo, se describen los distintos parámetros que el usuario de la energía eléctrica debe controlar para evitar sanciones por parte de la empresa distribuidora de energía eléctrica.

Posteriormente, se expone el origen de la corriente de arranque de los motores y sus efectos cuando éstas no son controladas, así como también los distintos métodos de arranque de motores para minimizar el impacto de dicha corriente.

Finalmente, se realizó un estudio en la empresa DARSA, la cual se dedica a la destilación de alcoholes y rones a partir de melaza de caña de azúcar, para lo cual utiliza motores eléctricos trifásicos, y se estableció que era conveniente el uso de un arrancador suave para disminuir los costos de facturación eléctrica.

1. MEDICIÓN Y COSTOS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

1.1 Antecedentes

La generación de energía eléctrica en Guatemala se remonta al año de 1894, cuando se instaló la primera hidroeléctrica en la finca El Zapote al norte de la ciudad capital.

En un principio se construyeron pequeñas centrales generadoras en distintos puntos del país para cubrir las necesidades de cada región, por ejemplo, la hidroeléctrica Palín brindó servicio a los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Escuintla; la hidroeléctrica Santa María cubría a Quetzaltenango, Sololá y Suchitepéquez; la hidroeléctrica Río Hondo abastecía al oriente del país.

Años más tarde, debido al crecimiento de la demanda de energía y para atender los planes de electrificación, se instalaron más centrales generadoras en distintos puntos del país, con lo cual creció la red eléctrica nacional. Para la década de 1980, los grandes generadores de energía eléctrica eran el Instituto Nacional de Electrificación (INDE) y la Empresa Eléctrica de Guatemala (EEGSA), los cuales cubrían la mayor parte de la demanda eléctrica del país. Existían una cantidad mínima las generadoras de carácter privado.

Fue hasta la década de 1990 cuando se observó el apogeo de las generadoras privadas. Las más importantes son las instaladas en los ingenios azucareros, ENRON, SIDEGUA, GENOR; sin embargo, estas generadoras contribuían únicamente con el 23 por ciento de la generación de electricidad total del país, y además tenían que venderla al INDE y a la EEGSA, ya que la distribución operaba en un mercado monopólico.

De igual manera, las empresas distribuidoras estaban obligadas a comprar al INDE, y los generadores privados no podían competir entre sí y vendían solamente al INDE y a la EEGSA. La red de transmisión de energía eléctrica estaba parcialmente abierta y limitaba las transacciones que pudieran hacerse en el mercado.

1.2 Ley general de electricidad

Para solucionar el problema de monopolización que existía dentro del sector eléctrico, en 1993 se suscribieron los contratos a término de venta de energía entre generadores privados y el INDE y la EEGSA. Sin embargo, esta situación no promovía la competencia y solamente trataba de superar la deficiencia existente en el suministro de energía que vivía el país. De esa cuenta, era evidente la ausencia de un marco legal que estableciera las normas que permitieran el funcionamiento de un mercado competitivo que incentivara la participación de otros agentes con el debido respaldo jurídico. En este sentido, a partir de 1996 se inició la aprobación de la nueva legislación del mercado eléctrico en Guatemala, la cual se fundamenta en el marco jurídico e institucional siguiente:

- Ley General de Electricidad. Decreto número 93-96 del Congreso de la República del 13 de noviembre de 1996.
- Reglamento de la Ley General de Electricidad. Acuerdo Gubernativo número 256-97 del 21 de marzo de 1997.
- Constitución de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. 28 de mayo de 1997.
- Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista. Acuerdo Gubernativo número 299-98 del 28 de mayo de 1998.
- Constitución del Administrador del Mercado Mayorista. 23 de julio de 1998.

La base principal del modelo adoptado con el nuevo marco legal que rige el sector eléctrico es la separación de funciones de la actividad eléctrica, generación, transporte y distribución, lo cual impide que una misma compañía realice las tres funciones. Además se definió un modelo para la determinación de los precios de distribución eléctrica.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) vela, entre otras cosas, por el cumplimiento de normas relacionadas con la calidad de servicio que recibe el usuario final. El Administrador de Mercado Mayorista (AMM) es una entidad privada sin fines de lucro, cuyas funciones son, entre otras, la coordinación de la operación de centrales generadoras, de interconexiones internacionales y de líneas de transporte al mínimo costo, dentro de un marco de libre contratación de energía entre agentes.

1.3 Obligaciones del usuario de energía eléctrica

Todos los puntos comprendidos dentro del nuevo marco legal del sector eléctrico buscan brindar un mejor servicio, a fin de que los usuarios finales reciban la energía eléctrica con la mejor calidad y al menor costo posible. En este orden, es del caso indicar que los usuarios también tienen obligaciones que cumplir, las cuales al no ser observadas se castigan con penalizaciones. Así por ejemplo, en el artículo 13 de las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD), el usuario está obligado a pagar al distribuidor las indemnizaciones que correspondan por incumplimiento de la calidad del servicio de energía eléctrica, es decir, si el usuario incide de manera negativa en la calidad del servicio eléctrico, se verá sujeto a sanciones económicas que deberá pagar al distribuidor.

Los parámetros eléctricos que un usuario debe controlar dentro de su instalación para evitar ser objeto de sanciones se definen en las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD), y son los siguientes.

1.3.1 Distorsión armónica

La distorsión armónica es la alteración de la onda senoidal de corriente o de tensión eléctrica de frecuencia nominal, ocasionada por la presencia de señales eléctricas senoidales de frecuencias diferentes y múltiples de dicha frecuencia nominal. Afecta a gran variedad de equipos eléctricos, produciendo alteraciones que van desde el mal funcionamiento y deterioro del equipo hasta la destrucción del mismo. La CNEE sanciona a los usuarios que en el interior de sus instalaciones generen distorsión armónica, ya que este fenómeno tiene la capacidad de transportarse a través de diferentes circuitos eléctricos y podría afectar a usuarios vecinos.

El artículo 44 indica que en los casos en que los distribuidores verifiquen que alguno de sus usuarios ha excedido las tolerancias para la distorsión armónica en las líneas de alimentación, éste se ve obligado a pagar una indemnización, la cual se calcula de acuerdo con las fórmulas especificadas en las Normas.

1.3.2 *Flicker*

El *flicker* es una sensación visual molesta para el ojo humano que se presenta cuando una luz brilla en forma intermitente. En términos eléctricos, el *flicker* es una variación rápida y cíclica del voltaje, que causa una fluctuación correspondiente en las lámparas que se encuentran conectadas a líneas de voltaje con mala calidad de servicio.

Según el artículo 48, un usuario que ha excedido las tolerancias de *flicker* establecidas en las Normas deberá pagar al distribuidor una indemnización en función a la distorsión penalizable individual de *flicker*. Es decir, si un usuario está generando *flicker* dentro de su instalación, al igual que con la distorsión armónica, el efecto se transporta a las líneas de la empresa distribuidora y puede generar el problema de *flicker* en otros usuarios o en el alumbrado público. Es por ello que se debe mantener este valor dentro de los parámetros que se establecen en las Normas.

1.3.3 Factor de potencia

El factor de potencia es un indicador del nivel de aprovechamiento de la energía eléctrica en una instalación; si es bajo, la energía desperdiciada se traduce en costos para la distribuidora. Es por ello que este factor también es objeto de penalización. El artículo 49 dispone que el valor mínimo de factor de potencia se establece de acuerdo con la potencia del usuario:

Usuarios con potencias de hasta 11 kW:	0.85
Usuarios con potencias superiores a 11 kW:	0.90

1.3.4 Variación de la potencia contratada

El artículo 75 indica que en el caso de que el distribuidor detecte que la potencia utilizada por el usuario es mayor que la contratada, el distribuidor le podrá cobrar la potencia utilizada en exceso (exceso de demanda) a un precio máximo de dos veces el valor del cargo unitario por potencia contratada de la tarifa correspondiente, por cada kilovatio utilizado en exceso. Actualmente, el valor de penalización por exceso es de 2 veces el valor del cargo unitario.

1.4 ¿Qué es la demanda eléctrica?

La demanda es el consumo de potencia de todos los equipos de una instalación operando simultáneamente durante un período fijo de tiempo, y se mide en kilovatios. En otras palabras, es la cantidad de electricidad que una instalación requiere en cualquier momento dado.

El uso que se le da a la electricidad varía con cada usuario, así como los requerimientos de cuánta potencia utilizan, cómo y cuándo lo hacen. Es muy fácil medir la cantidad de energía consumida por un usuario durante un período de tiempo, lo difícil es saber como y cuándo va a utilizar tal potencia. Debido a esto, el distribuidor de energía tiene que diseñar y construir sus sistemas para ser capaces de suministrar tanta potencia como sea requerida por el usuario en el momento preciso que la desea. El distribuidor debe tener siempre suficiente capacidad de suministrar la potencia que el usuario demande en cualquier momento. Para cumplir estos requerimientos, se requiere tener un complejo arreglo de equipo, como transformadores, líneas, subestaciones, etc.

1.5 ¿Por qué se mide la demanda?

Los cargos por demanda son la forma en que el distribuidor comparte los costos de mantener todo el equipo eléctrico disponible para suministrar suficiente electricidad cuando ésta sea requerida, razón por la cual, se registra el nivel más alto de demanda que se alcanzó durante el mes y es éste el valor que será facturado, ya que el mismo refleja el nivel de potencia que debe estar disponible para ser suministrado cuando el usuario lo requiera.

1.6 Método de medición de la demanda

La demanda eléctrica se mide en intervalos de 15 minutos durante el período de facturación de un mes, y este valor es registrado por un aparato de medición llamado demandómetro, el cual almacena el nivel más alto de demanda durante el mes, y servirá para hacer el cobro por potencia máxima.

Durante el intervalo de 15 minutos, el demandómetro mide los consumos simultáneos de corriente del usuario para hacer el registro de la mayor corriente demandada durante el mes. De esta manera, aun los picos de corrientes de corta duración que produce el arranque de un motor contribuyen a la medición de la demanda de una instalación eléctrica.

La empresa eléctrica instala medidores demandómetros a los clientes que tienen una demanda de potencia máxima superior a los 10 kilovatios en el mes. En la actualidad, los medidores análogos están siendo reemplazados por medidores electrónicos, ya que éstos tienen la capacidad de medir y registrar una mayor cantidad de variables eléctricas y sirven a la empresa eléctrica para determinar si el usuario le está dando un buen uso a la energía. De esta manera, puede calcular las penalizaciones que va a cobrar por cuenta del usuario, así como medir la calidad de energía que suministra a los usuarios en el punto de aplicación, gracias a la diversidad de funciones que tienen los medidores electrónicos y su capacidad de almacenamiento de datos en bancos de memoria integrados a los mismos.

En cualquier tipo de medidor, el método para registrar la demanda máxima de potencia de una instalación es similar, en cada demandómetro existe un temporizador de reinicio. Este temporizador establece el intervalo de demanda cada 15 minutos. Durante el intervalo de demanda, el medidor detecta la corriente que pasa por él y registra el valor más alto.

Al final de cada intervalo de demanda, el medidor automáticamente se reinicia y empieza a grabar para el siguiente intervalo. Este proceso registra continuamente la demanda en la instalación, sustituyendo el valor registrado cuando mide un valor más alto que el anterior. El despliegue de la máxima demanda se observa en una pantalla montada en el medidor. Una vez tomada la lectura mensual, la máxima demanda se reinicia y el medidor empieza a grabar continuamente períodos de demanda de 15 minutos hasta que se toma la siguiente lectura.

1.6.1 El demandómetro

El uso del demandómetro ha hecho posible desde hace muchos años la medición de la potencia que un usuario requiere en un instante determinado, y ayuda a la empresa eléctrica a establecer los cargos por potencia máxima en las instalaciones.

El demandómetro es un medidor de energía al que se le ha agregado un circuito de medición de demanda, el cual detecta, registra y despliega el valor de potencia máxima de una instalación, así como los valores de energía consumida en kilovatios hora.

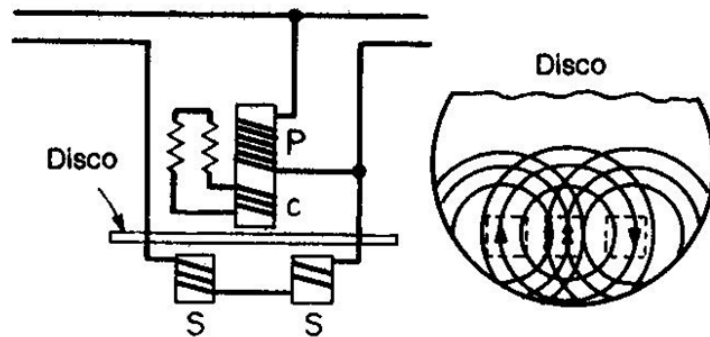
Existen dos tipos de demandómetros: el electromecánico, que basa su funcionamiento en elementos mecánicos para establecer sus lecturas, y el demandómetro electrónico, que utiliza dispositivos de estado sólido para hacer su función.

1.6.1.1 Demandómetro electromecánico

El demandómetro electromecánico registra tanto la cantidad de energía eléctrica consumida como la demanda de la instalación, basándose en un disco de aluminio que gira mientras las corrientes eléctricas pasan a través del medidor.

Los medidores electromecánicos miden la energía empleando el principio del motor de inducción. Las características esenciales de este tipo de medidor se muestran en la figura 1: P es una bobina de voltaje, S las bobinas de corriente en serie y c una bobina compensadora. El disco de aluminio gira libremente entre los polos. Los flujos alternos de estos polos establecerán las corrientes en el disco, como indica la flecha en el diagrama de la figura 1, que muestra los polos y una porción del disco. El devanado de voltaje P tiene muchas vueltas y es altamente inductivo, de modo que el flujo de su extremidad polar está retrasado del voltaje aplicado en casi 90° . Los flujos en los polos de corriente, establecidos por la corriente de línea en las bobinas en serie S , están en fase con la corriente.

Figura 1. Esquema de un medidor de energía electromecánico



Fuente: Donald Fink y Beaty, Wayne, **Manual de ingeniería eléctrica**, Pág. 3-36

Se producirá un momento de torsión que es proporcional a la potencia en el circuito de carga, si los flujos de los polos P y S están en completa cuadratura a un factor de potencia unitario en la carga.

Para obtener una velocidad proporcional del rotor al momento de torsión activo, se aplica un par de retardo (frenado) sobre el disco que sea proporcional a la velocidad, lo cual se efectúa por medio del campo magnético de un imán permanente a través del cual el disco se mueve, produciendo corrientes parásitas proporcionales a su velocidad. La interacción entre estas corrientes parásitas y el flujo del imán origina un momento de torsión en oposición (o efecto de frenado) que es proporcional a la velocidad del rotor. En consecuencia, ésta es proporcional al par activo y, por consiguiente, a la potencia en el circuito. El disco, a su vez, está conectado por medio del eje al registrador del medidor y a un tren de engranajes que mueve las agujas del despliegue para tomar la lectura.

Hay dos clases generales de medidores de demanda: los medidores integrados de demanda y los medidores térmicos de demanda. Ambos tienen la misma función, que es medir energía de manera tal que el valor registrado sea una medida de carga cuando ella afecta al calentamiento (y en consecuencia a la capacidad del transporte de carga) del equipo eléctrico.

Los medidores con demanda integrada constan de un elemento medidor integrador (kilovatios hora) que acciona un mecanismo en el cual un dispositivo de tiempo regresa a cero el sensor de demanda al final de cada intervalo de tiempo. Así deja indicada la demanda máxima sobre una aguja indicadora pasiva, que a su vez se restablece en forma manual a cero en cada período de facturación.

Tales mecanismos de demanda operan sobre lo que se conoce como el principio de intervalo de bloque, en el que la máxima demanda obtenida entre cada período de facturación se indica sobre una escala o pantalla numérica y se reinicia al final de cada período.

Los medidores térmicos de demanda son dispositivos en los que la indicación de la demanda máxima está subordinada a un retraso de tiempo característico por medios mecánicos o térmicos. La indicación se diseña a menudo para seguir la curva de calentamiento exponencial de equipo eléctrico. Tal respuesta, inherente en los medidores térmicos, se promedia sobre una base logarítmica y continua, lo que significa que las cargas más recientes se ponderan excesivamente, pero que, conforme pasa el tiempo, su efecto disminuye. Las características de tiempo para los medidores retrasados se definen como el tiempo nominal requerido para 90 por ciento de la indicación final con una carga constante aplicada de manera repentina.

1.6.1.2 Demandómetro electrónico

Los medidores electrónicos que utiliza la empresa eléctrica para registrar los valores de demanda son más complejos que los antiguos, que funcionaban con base en elementos electromecánicos. Estos nuevos medidores se basan en microprocesadores y circuitos integrados utilizando bancos de memoria de tres tipos diferentes: memoria ROM (*read only memory*) o memoria de solo lectura, que contiene el sistema operativo del demandómetro; la memoria RAM (*random access memory*) o memoria de acceso aleatorio, la cual contiene los programas y datos para la facturación; y la memoria NOVRAM (*nonvolatile random access memory*) o memoria de acceso aleatorio no volátil, la cual mantiene los datos durante apagones.

El demandómetro electrónico es un medidor de energía del tipo de disco giratorio y cuenta además con un circuito temporizador y un registrador para establecer las mediciones de energía y de demanda. El registrador obtiene pulsos del elemento medidor por medio de sensores de rotación que envían un pulso por cada vuelta que completa el disco giratorio. De esta forma, el microprocesador lo almacena tanto en el medidor de energía como en el medidor de demanda. El valor presente de demanda es comparado con el valor almacenado como demanda máxima; si éste es mayor que el almacenado, entonces lo sustituye. El microprocesador lleva la cuenta de cada intervalo y al final de los 15 minutos reinicia el valor presente de demanda a cero para volver a iniciar con otro intervalo de 15 minutos.

La medición de demanda de cualquier tipo de demandómetro se basa en el mismo principio, que es censar la corriente que circula por el medidor y registrar el valor más alto durante el período de facturación.

1.7 ¿Cómo se calcula una factura eléctrica industrial?

Generalmente son tres los factores que se consideran para integrar las facturas de consumo de energía eléctrica: la energía consumida, la potencia contratada y las penalizaciones por incumplimiento de las NTSD.

1.7.1 Cargos por energía consumida

Los cargos por concepto de energía consumida sirven para compensar los gastos de combustible, mantenimiento y otros gastos relacionados con la generación y distribución de la energía eléctrica.

Los costos de operación de la parte de la factura de consumo de energía eléctrica se basan en el número de kilovatios hora (kWh) registrados en el término de cierto período, generalmente un mes de servicio.

Los kWh se miden por integración del consumo a lo largo del tiempo. Los medidores mecánicos llevan a cabo esta integración por medio de un sistema que va desplazando unos engranajes con indicadores durante el período de consumo. Los medidores electrónicos hacen el equivalente por medio de manejo de información. En este caso también es posible medir el consumo en diferentes períodos del día.

1.7.2 Cargos por potencia contratada

Los usuarios de energía eléctrica por encima de los 11 kilovatios necesitan hacer un estudio de carga para poder recibir el servicio de energía eléctrica. Dicho estudio se basa en la demanda que el usuario tendrá durante el mes de servicio, y se especifica en kilovatios. De esta manera, se realiza un contrato con el distribuidor de energía para establecer la cantidad de potencia (kilovatios) que el usuario necesitará durante el mes de servicio. Según la cantidad de potencia contratada, así será el valor de cada kilovatio.

1.7.3 Cargos por penalizaciones de incumplimiento a las NTSD

Si un usuario no cumple con los requisitos establecidos por las NSTD, se verá obligado a indemnizar económicamente al distribuidor bajo los siguientes rubros.

1.7.3.1 Cargos por factor de potencia

Debido a que la compañía suministradora del fluido eléctrico tendrá que transmitir una corriente mayor a un sistema con bajo factor de potencia, se ha introducido una cláusula al respecto para llevar a cabo la facturación. Esta cláusula ofrece una reducción en las cuotas de consumo para cargas con factor de potencia alto, o impone una multa si el factor de potencia es bajo. Los nuevos contadores electrónicos registran el factor de potencia del usuario y despliegan esta información para que sea facturada.

1.7.3.2 Cargos por exceso de demanda

Los cargos por concepto de exceso de demanda se basan en los costos de generación de la energía eléctrica, de la transmisión y de la distribución de la misma, tomando en cuenta los medios disponibles para tal efecto. Se incluyen aquí los cargos redituables de la inversión, incluyendo intereses, impuestos, amortizaciones, etc.

Como se mencionó anteriormente, entre mayor sea la demanda de energía en un momento dado, más alto será también el cargo por demanda o potencia máxima. De esta manera, al exceder la cantidad de potencia contratada, el cobro de la potencia utilizada en exceso se facturará al doble del valor de cada kilovatio contratado.

1.8 Detalle de la factura eléctrica

Es importante conocer el detalle de la factura eléctrica para poder identificar las áreas en las que se puede hacer una reducción de costos. Dentro de la factura se especifica el detalle de los cargos de la siguiente manera.

1.8.1 Generación y transporte (cobro por cuenta de terceros)

Esta es la parte de la factura que le corresponde al generador y transportador de la energía. Se divide en cargo por generación y transporte y cargo por potencia máxima. El cargo por energía tiene un valor de **X** quetzales por cada kilovatio-hora que se consume, es decir, se cuentan los kilovatios-hora consumidos durante el mes y se multiplican por el valor unitario de cada kilovatio-hora, el cual depende del contrato suscrito por el usuario con la empresa eléctrica. El cargo por potencia máxima tiene un valor unitario de **Y** quetzales por kilovatio, el cual se calcula al multiplicar el máximo valor de kilovatios demandados en la instalación por el correspondiente valor unitario.

1.8.2 Distribución

Es la parte que corresponde al distribuidor de la energía eléctrica y se divide en cuatro cargos: cargo fijo por cliente, cargo por distribución de energía, cargo por potencia máxima y cargo por potencia contratada.

El cargo fijo por cliente es un cargo que se realiza aun y cuando el usuario no utilice la energía eléctrica durante el período de facturación.

El cargo por distribución de energía se obtiene de la misma manera que en los cargos por generación y transporte, es decir, multiplicando el número de kilovatios hora consumidos por el valor unitario de la energía.

La potencia máxima es la que se calcula al tomar el valor de demanda máxima, registrado por el demandómetro, y multiplicarla por el cargo unitario de potencia máxima.

La potencia contratada se basa en la cantidad de potencia que el usuario necesita mensualmente, y el cargo depende del contrato entre el usuario y la distribuidora.

1.8.3 Penalización por incumplimiento a NTSD

En este renglón se hacen los cobros por las distintas penalizaciones de que puede ser objeto el usuario por no cumplir con las Normas Técnicas del Servicio de Distribución (NTSD).

1.9 Efectos de la demanda en la facturación eléctrica

El cargo por potencia máxima es mayor que el cargo por energía, según consta en el pliego tarifario que emite la CNEE. De los dos cargos, es el que se puede reducir si se toman las acciones necesarias. El control de la demanda eléctrica puede ser una oportunidad de ahorro económico muy rentable. Reducir los picos de demanda tiene como consecuencia menores cargos por demanda ya que se reduce la potencia máxima consumida en la instalación y, por lo tanto, también se reduce la factura eléctrica.

Los motores eléctricos son una fuente importante de picos de demanda, ya que durante el arranque consumen grandes cantidades de corriente que el demandómetro detecta y registra como potencia máxima demandada por la instalación. En el siguiente capítulo se explicará con mayor detalle el origen y los tipos de corriente de arranque de los motores eléctricos, así como los efectos que éstas producen, para comprender la manera en que se pueden reducir al instalar dispositivos arrancadores. Estos pueden controlar la corriente que el motor requiere para el arranque y de esta manera contribuir a minimizar el valor de potencia máxima en la instalación.

2. CORRIENTES DE ARRANQUE EN MOTORES ELÉCTRICOS

2.1 Arranque de motores

Se denomina arranque de un motor al régimen transitorio en el que se eleva la velocidad del mismo desde el estado estacionario hasta el estado del motor girando a la velocidad de régimen permanente. El conjunto que se pone en marcha es inercial y disipativo.

El estudio del arranque de los motores tiene una gran importancia práctica, ya que la elección correcta de las características de los motores eléctricos y arrancadores está basada en el conocimiento de las particularidades de este régimen transitorio.

El comportamiento dinámico del conjunto motor-máquina accionada está regido por la siguiente ecuación diferencial:

Ecuación 1:

$$T_m - T_r = J \frac{dw}{dt}$$

Donde:

T_m	:	Par motor
T_r	:	Par resistente
J	:	Momento de inercia del conjunto motor-máquina accionada
dw	:	Cambio de la velocidad angular
dt	:	Cambio respecto al tiempo

Por lo tanto, para que el conjunto comience a girar se necesita que el par motor supere al par resistente con el fin de generar una aceleración angular de arranque. El proceso de arranque finaliza cuando se equilibra el par motor con el par resistente, estabilizándose la velocidad de giro del motor.

La resolución analítica de la ecuación diferencial que rige el fenómeno de aceleración no es posible porque T_m y T_r están generalmente representados en gráficos o tablas, y no por funciones que puedan ser integradas con métodos analíticos.

Es necesario entonces resolver el problema con métodos numéricos al resolver la ecuación 1 y reescribirla de la siguiente forma:

Ecuación 2:

$$\Delta t = \frac{J \cdot \Delta \omega}{T_m - T_r}$$

Donde:

Δt : Intervalo de tiempo de arranque

J : Momento de inercia del conjunto motor-máquina accionada

$\Delta \omega$: Intervalo de velocidad angular

T_m : Par motor

T_r : Par resistente

Se observa que la aceleración se puede calcular hasta que $T_m = T_r$, es decir, cuando el denominador tiende a cero, el motor alcanza la velocidad de régimen o velocidad nominal.

Como el par motor es el producto de la corriente absorbida por el flujo del campo magnético, además de un factor que caracteriza al tipo de máquina, este mayor par de arranque está asociado a una mayor corriente de arranque, la que no debe superar determinado límite por el calentamiento de los conductores involucrados.

2.2 Corriente de arranque

Los motores eléctricos de corriente alterna tienen el defecto de consumir, durante el arranque, corrientes de varias veces el valor nominal. Estas grandes corrientes pueden causar que los dispositivos de protección las censen como corrientes de falla si no están adecuadamente coordinados. Al fluir a través de las impedancias del sistema, estas corrientes provocan caídas de tensión, lo cual a su vez causa mal funcionamiento de contactores y posible daño a equipo sensible cercano. Estas caídas de tensión también afectan al mismo arranque, ya que si el voltaje cae demasiado, el motor no arrancará y podrá sufrir daños por sobrecalentamiento en sus devanados al quedar sobreexpuestos a corrientes demasiado elevadas.

El transitorio de corriente que ocurre cuando se energiza un motor es una alta corriente que fluye durante la aceleración del motor desde el reposo hasta su velocidad nominal. Estas altas corrientes de arranque ocurren porque en el momento de energizar el motor se da el mismo efecto que cuando tiene el rotor bloqueado, es decir, no existe fuerza contraelectromotriz en él que se oponga a la corriente que fluye, y la impedancia inicial del motor es de valores tan pequeños que es casi un corto circuito. Una vez el rotor comienza a girar, la corriente disminuye y eventualmente alcanza un valor más bajo, es decir, su valor nominal.

2.3 Tipos de corriente de arranque

Los transitorios de corriente se forman de dos componentes distintos que son corriente de irrupción y corriente de rotor bloqueado.

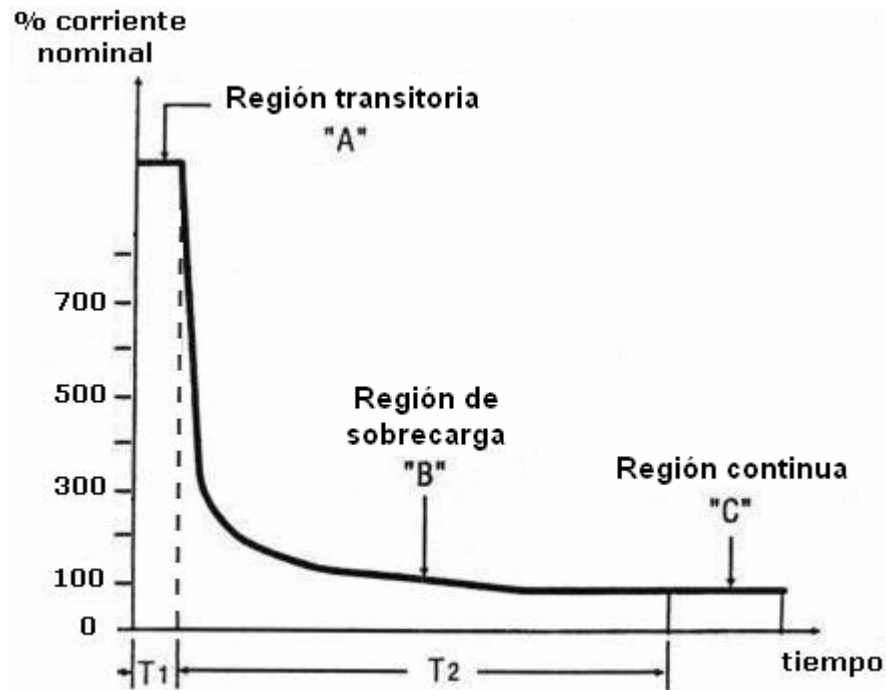
2.3.1 Corriente de irrupción

La corriente de irrupción se necesita para establecer un campo magnético en el núcleo de hierro de las máquinas eléctricas, como motores y transformadores cada vez que se les aplica voltaje. El valor pico de esta corriente de irrupción, que puede ser tan alto como 20 veces su corriente nominal, será diferente cada vez que el equipo se energice debido al magnetismo residual en el núcleo. A pesar de que alcanza valores pico muy altos, la componente irruptiva en un motor típico decae rápidamente. El valor pico y la duración son características del motor y completamente independientes de la carga.

2.3.2 Corriente de rotor bloqueado

La corriente de irrupción solo es una parte menor del transitorio de arranque de motores; la corriente de rotor bloqueado es normalmente el obstáculo para arrancar satisfactoriamente el motor sin efectos adversos en el sistema de potencia, ya que, como se indicó anteriormente, en el instante en que el rotor está bloqueado, no existe ningún flujo magnético en la máquina que se oponga al flujo de corriente en los devanados del motor. Este efecto disminuye con la aceleración del rotor.

Figura 2. Curva de corriente contra tiempo en el arranque de un motor eléctrico



Fuente: Robert Mroczkowski, **Electric connector handbook: Technology and applications**, Pág. 12.27

La figura 2 muestra tres regiones. La A es la región transitoria, la cual permite observar cuando el rotor bloqueado es inicialmente energizado. Esta corriente se puede considerar como un transitorio, debido a que generalmente dura menos de un ciclo de corriente.

La región B representa la condición de sobrecarga mientras el motor acelera bajo carga y absorbe más corriente que los requerimientos a velocidad nominal. La duración de esta región depende del diseño del motor.

La región C se inicia cuando el motor pasa del 85 por ciento de su velocidad nominal y comienza a estabilizarse.

Con carga nominal, el rotor de un motor de inducción de corriente alterna gira a una velocidad levemente menor que la velocidad de sincronismo. La diferencia entre ambas velocidades se denomina deslizamiento, el cual permite que el motor desarrolle su par. De hecho, si la carga aumenta, tiende a aumentar el deslizamiento. El efecto es un incremento en el par del rotor y de la corriente para satisfacer los requerimientos de la carga.

Cada vez que el motor opera con deslizamiento mayor que el nominal, la corriente excederá su valor nominal. Las sobrecargas mecánicas disminuyen levemente la velocidad del rotor y aumentan levemente la corriente. Por otra parte, si la velocidad del rotor disminuye por debajo del 85 por ciento, la corriente aumenta a valores muy altos independientes de la velocidad. Inversamente, en el arranque las corrientes del motor se mantienen a niveles altos, hasta que el motor y la carga han acelerado cerca del 85 por ciento, punto en el cual la corriente decaerá rápidamente hasta sus valores nominales.

En resumen, en el momento del arranque (cuando la velocidad del rotor vale cero), el motor se comporta como una impedancia de valor bajo, por lo tanto, la corriente de arranque es grande. Una vez que el motor empieza a girar, el valor de esta impedancia se incrementa gradualmente, por lo que la corriente de arranque disminuye. La condición más crítica es cuando la velocidad vale cero.

2.4 Efectos de la corriente de arranque

Un motor eléctrico conectado directamente a la línea de voltaje consume grandes cantidades de corriente durante el arranque. La consecuencia inmediata es un aumento súbito y de corta duración en el par del motor el cual podría ocasionar daños a las cargas conectadas a él.

Por otra parte, estas corrientes pueden causar diversos problemas tales como fallas en el funcionamiento del motor y desperfectos en las instalaciones. Seguramente estos problemas se reflejarán en una elevada facturación de energía eléctrica.

Dentro de las consecuencias de la falta de control en las corrientes de arranque de los motores eléctricos se pueden mencionar las siguientes.

2.4.1 Dispositivos de control

El exceso de corriente que un motor eléctrico requiere durante el arranque puede ser la causa del mal funcionamiento o incluso daño de dispositivos de control de motores debido a que esta alta corriente es de 6 a 8 veces la corriente nominal y tales dispositivos, como contactores, fusibles y relés, normalmente no están dimensionados para soportar tal cantidad de corriente. Por eso durante el arranque del motor, podría existir mal funcionamiento de fusibles y relés de protección al malinterpretar la corriente de arranque como corriente de falla y, de esta manera, los dispositivos sacarían de servicio al motor durante el intento de arranque.

En el caso de los contactores, éstos podrían ser expuestos a corrientes muy altas y es posible que se dañaran los contactos al conducir corrientes por encima de su diseño.

En cualquier caso, el daño o mal funcionamiento de los dispositivos de control se traduce en costos de reparación y/o mantenimiento, paro de líneas de producción y el deterioro gradual de tales dispositivos.

2.4.2 Caída de tensión en la instalación

Las caídas de tensión o de voltaje producidas por arranque de motores eléctricos se pueden definir como variaciones bruscas y repetidas de pequeña amplitud que se presentan en una red eléctrica de manera aleatoria.

Cuando el transitorio de corriente ocasionado por el arranque de un motor eléctrico fluye a través del sistema de potencia de la fuente al motor, las líneas de alimentación incrementan considerablemente su carga y se produce una caída de voltaje igual al producto de la corriente y la impedancia del sistema. Las caídas excesivas de voltaje durante el arranque entre el motor y la fuente pueden significar bajos voltajes en las terminales del motor y de la misma instalación, provocando que cargas cercanas reciban las mismas caídas de voltaje provocando la operación irregular o posible daño de las mismas.

Los sistemas de iluminación son los que con mayor frecuencia sufren los efectos de las caídas de tensión al igual que los dispositivos electrónicos, ya que ambos son muy sensibles a la variación de voltaje en sus terminales. Al quedar expuestos constantemente a las caídas de tensión, estos elementos pueden sufrir daño gradualmente.

2.4.3 Sobre calentamiento de motores

Los devanados de los motores se diseñan con base en la potencia, número de polos, corriente nominal y factor de servicio, solo por mencionar algunas de sus características. De igual forma, el aislamiento que cubre a los devanados tiene características propias que definen su tolerancia térmica.

Cuando los devanados se exponen a las altas corrientes de arranque que caracterizan a los motores, con el tiempo se van degradando debido a los cortos períodos que su temperatura alcanza valores por encima de su diseño y naturalmente provoca una reducción en su vida útil.

Como se indicó en el apartado anterior, en donde se expone que se produce una caída de tensión en las terminales del motor debido al arranque, ello provoca que el motor tarde más tiempo en el proceso de aceleración hasta alcanzar la velocidad nominal, produciendo una exposición aún más prolongada a la elevación de temperatura en los devanados del motor y haciendo más significativo el efecto de la alta temperatura en los devanados, lo cual a su vez genera pérdidas por efecto Joule.

2.4.4 Distorsión de energía en la instalación

La calidad de la energía es un factor de suma importancia que alcanza a la mayoría de usuarios industriales, comerciales y residenciales de alguna manera. La distorsión de la energía eléctrica afecta a muchos usuarios provocando pérdidas debido a daño de equipo, paros momentáneos en prestación de servicios o líneas de producción y provoca el deterioro gradual del equipo eléctrico y electrónico.

Las perturbaciones en la red eléctrica debido a fenómenos transitorios es un tema que preocupa cada vez más debido al creciente desarrollo de componentes electrónicos, los cuales funcionan en gran parte con base en microprocesadores, los cuales son significativamente más sensibles que los existentes hace apenas algunos años. Sin duda estos componentes han aumentado su capacidad y eficiencia, pero se han vuelto significativamente más vulnerables a los transitorios eléctricos.

Aproximadamente el 80 por ciento de los transitorios que afectan a una instalación se generan internamente. El acto simple de apagar una luz, un motor, la fotocopiadora o cualquier otro dispositivo eléctrico puede perturbar el circuito eléctrico y crear transitorios. En general, cuanto más grande es la corriente de carga, mayor es el disturbio cuando la carga se enciende o se apaga. La conmutación de cargas de alto amperaje, como los motores eléctricos, crean transitorios en el sistema y éstos tienen la particularidad de transmitirse entre circuitos, es decir, entre un circuito de fuerza y uno de iluminación o comunicación por ejemplo, causando problemas en el equipo sensible conectado.

2.4.5 Daño a cargas mecánicas conectadas al motor

Los motores eléctricos suministran potencia motriz a una amplia variedad de maquinaria industrial. Ninguna otra forma de impulsión puede igualar su adaptabilidad, confiabilidad y economía. La creciente mecanización de la industria requiere el uso cada vez mayor de motores eléctricos en máquinas, herramientas, compresores, bandas transportadoras en líneas de producción, ventiladores, bombas, etc. La aplicación con éxito de los motores depende de la selección de un tipo de motor que satisfaga las necesidades cinéticas de arranque, funcionamiento y detención de la maquinaria accionada.

Los tipos de carga mecánica que puede tener un motor son muy variables dependiendo de su aplicación. Así, la carga que maneja una bomba consiste en el desplazamiento de un fluido, un compresor tendrá una carga variable durante su ciclo de trabajo, y una banda transportadora se encargará de trasladar materiales diversos de un punto a otro dentro de una planta de producción.

En este sentido, es muy importante el método de arranque de tales motores, ya que fluctuaciones bruscas en su accionar podría ocasionar daños a las cargas mecánicas que tienen conectadas.

Por ejemplo, un arranque no controlado en el motor de una bomba podría ocasionar el fenómeno hidráulico conocido como golpe de ariete, el cual es una fuerza vibradora dentro de una tubería que ocurre cuando se produce un aumento brusco en la presión del fluido y puede producir fallas en válvulas, ruptura de tubería o bolsas de aire que producen cavitación.

En el caso de un compresor, si se genera una corriente de arranque demasiado elevada, el par que genera el motor en ese instante también es muy elevado, lo cual provoca transitorios en el fluido y provoca fatiga en las válvulas, ya que se produce un movimiento impulsivo el cual ocasiona daños al compresor.

En el caso de motores que accionan bandas transportadoras en líneas de producción, al no tomar precauciones respecto al arranque, los transitorios mecánicos provocados por la corriente de arranque dañan los *sprockets* que mueven las cadenas de transmisión, ya que se someten a esfuerzos mecánicos por encima de su diseño y se producen fallas prematuras en los mismos, ocasionando paros de maquinaria y los consecuentes mantenimientos imprevistos.

2.4.6 Elevación de los costos de la energía eléctrica

Una de las principales preocupaciones en la industria que utiliza motores eléctricos es la variación en los costos de energía eléctrica.

Por una parte, existen las regulaciones impuestas por las empresas distribuidoras de energía eléctrica con las penalizaciones por demanda máxima, que se han agudizado con el cambio de los demandómetros de análogos a digitales. Estos últimos registran de mejor manera el uso que cada usuario le da a la energía, lo que hace que los costos mensuales por concepto de energía eléctrica vayan en aumento en las empresas usuarias de la energía eléctrica.

Por ejemplo, cuando un motor eléctrico grande se enciende, causará que el medidor detecte una alta cantidad de corriente en la línea de voltaje y la registre. La máxima demanda por mes es la que se utiliza para calcular la factura eléctrica. Una vez tomada la lectura mensual, la máxima demanda se reinicia y el medidor empieza a registrar la máxima demanda hasta que se toma la siguiente lectura. Reducir los picos de demanda tendrá como consecuencia menores cargos por demanda y, por tanto, menores facturas.

3. MÉTODOS DE ARRANQUE DE MOTORES ELÉCTRICOS

En los capítulos anteriores se ha indicado acerca de los inconvenientes que provoca arrancar un motor conectado directamente a las líneas de potencia. Al respecto, cabe señalar que desde hace algún tiempo se han utilizado métodos de arranque tradicionales para evitar el arranque directo, casi siempre por recomendación de la empresa eléctrica a fin de reducir los efectos dañinos de las altas corrientes de arranque sobre los circuitos de distribución. Sin embargo, tales métodos de arranque no disminuyen del todo el efecto del pico de corriente que se produce en los primeros ciclos del arranque. Con el desarrollo de la electrónica de potencia, han surgido circuitos arrancadores electrónicos capaces de controlar los parámetros de un motor, como la corriente y el par de arranque, con lo cual se pueden evitar los problemas que los métodos tradicionales de arranque no pueden solucionar.

3.1 Antecedentes

Uno de los factores fundamentales para la creación del interruptor eléctrico (también llamado *flip-on*) se derivó de la necesidad de contar con un dispositivo confiable y económico para proteger los motores eléctricos. Con casi 8 décadas de historia, el interruptor se ha desarrollado principalmente como un dispositivo de protección para redes eléctricas, dada la importancia que tienen los cables. Estos son el núcleo de un sistema de distribución eléctrica, ya que una sobrecorriente quemaría los cables por los cuales circula dicha corriente. A pesar de que los interruptores se usan primordialmente para protección de cables, dada sus características superiores de protección, se ha incrementado el uso de este tipo de dispositivo para la protección de motores eléctricos.

Recientemente, las altas corrientes de arranque de los motores han generado conflictos en el dimensionamiento de los interruptores, ya que por una parte deben permitir el arranque del motor, y por otra protegerlo contra sobrecargas. La falta de un conocimiento profundo de las corrientes de arranque ha sido el factor para especificar interruptores con capacidades arbitrarias con lo cual se pretende evitar que se disparen durante el arranque. Los progresos y mejoras alcanzados en la tecnología de los interruptores, así como un mejor conocimiento de la naturaleza, causa, duración y amplitud de las corrientes de arranque de los motores, han hecho posible desarrollar interruptores cuyas características de disparo sean acordes con el tamaño y características de los motores respectivos.

3.2 Tipos de arranque

Existen diferentes dispositivos arrancadores para motores, los cuales buscan alterar las características de corriente o par durante el arranque del motor.

Los arrancadores se pueden clasificar, según su construcción, en electromecánicos y electrónicos. Los arrancadores electromecánicos, como su nombre lo indica, son los que funcionan con base en elementos eléctricos y mecánicos para realizar su función, dentro de los cuales están el arrancador electromagnético, el estrella-delta y el autotransformador. Por otro lado, los arrancadores electrónicos, como el arrancador suave, son los que utilizan dispositivos de estado sólido para realizar el arranque. Por otra parte, los arrancadores se pueden dividir en dos tipos de acuerdo con el voltaje que entregan al motor durante el arranque, y son el arranque directo y el arranque a voltaje reducido, de los cuales veremos sus características a continuación.

3.2.1 Arranque directo

Se dice que un motor arranca en forma directa cuando sus bornes se conectan y desconectan directamente a la red de distribución. Se trata del tipo de arranque más sencillo.

El motor se basa en sus características naturales para arrancar, ya que en el momento de puesta bajo tensión, el motor actúa como transformador cuyo secundario está en cortocircuito en el caso de los motores de inducción tipo jaula de ardilla. La corriente que circula en el rotor es muy importante ya que es prácticamente proporcional a la corriente del estator. Si el motor arranca a plena carga, el devanado estático tiende a absorber una cantidad de corriente muy superior a la nominal, lo que hace que las líneas de alimentación incrementen considerablemente su carga y, como consecuencia directa, se produzca una caída de tensión y un recalentamiento en dichas líneas, lo cual puede provocar su desconexión.

Cuando las características de la carga mecánica conectada al eje del motor lo permita y cuando se mantenga la corriente de arranque y la caída de tensión en valores adecuados, es conveniente arrancar los motores a plena tensión, ya que de esta manera se obtienen valores muy altos de par de arranque. Pero si se tuvieran muchos motores de media y gran potencia que paran y arrancan en forma intermitente, se tendrá un gran problema de perturbaciones en la red eléctrica, además del inconveniente causado al valor de potencia máxima dentro de la instalación. En este sentido, es recomendable que el arranque directo de un motor solo se utilice en aquéllos de potencia inferior a los 7 hp, ya que en estos motores pequeños, debido a la mayor impedancia de sus devanados, se reduce la amplitud de la corriente de arranque.

Con motores de media y gran potencia, el arranque directo es inaceptable por el pico de corriente que se produce al conectar el motor.

3.2.1.1 Dispositivo

El dispositivo que se utiliza con mayor frecuencia en la industria como arrancador directo es el arrancador electromagnético, el cual funciona como un interruptor simple que conecta y desconecta el motor de la red. Tiene incluidas algunas protecciones básicas como protección de sobrecarga por relés térmicos y relés bimetálicos. Contiene contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados, una bobina retenedora, contactos auxiliares y botoneras de encendido/apagado.

Un arrancador electromagnético consiste en un contactor, el cual consta de una bobina retenedora devanada sobre un núcleo de hierro laminado y montada entre piezas polares de acero. Las piezas polares están recubiertas con material refractario. El conjunto está encerrado en una caja aislada, la cual se hace oscilar hacia abajo sobre los contactos. La bobina retenedora se conecta en paralelo con el contactor y cuando éste está cerrado, lleva la corriente del motor. La corriente establece un campo magnético a través del núcleo y las piezas polares de la estructura del retenedor, y a través de las puntas de contacto. Cuando se forma un arco, el campo magnético del núcleo y el del retenedor se repelen entre sí y se obliga al arco a subir, alejándose de los contactos. La acción de extinción, debida al alargamiento del arco y al enfriamiento del material refractario, es rápida en extremo y, como consecuencia, reduce en gran parte el desgaste y la quemadura de los contactos.

Existen arrancadores electromagnéticos con dos o tres contactos principales, los cuales sirven para interrumpir todos los circuitos de línea que van a motores monofásicos o trifásicos. Los contactores están diseñados para lograr interrupciones de hasta 10 veces la corriente nominal del motor, con base en los caballos de potencia nominales del arrancador.

Existen dos normas que rigen la construcción, tamaño y forma de los dispositivos para formar los arrancadores electromagnéticos: la norma NEMA y la norma IEC.

Figura 3. Arrancador electromagnético de norma NEMA



Fuente: Giménez, Cristóbal, **Dispositivos e instalaciones eléctricas**, Pág.35.

La tabla I muestra cómo se clasifican los arrancadores electromagnéticos según la norma NEMA para distintas capacidades de corriente y tamaños del motor.

Tabla I. Clasificación NEMA de arrancadores electromagnéticos

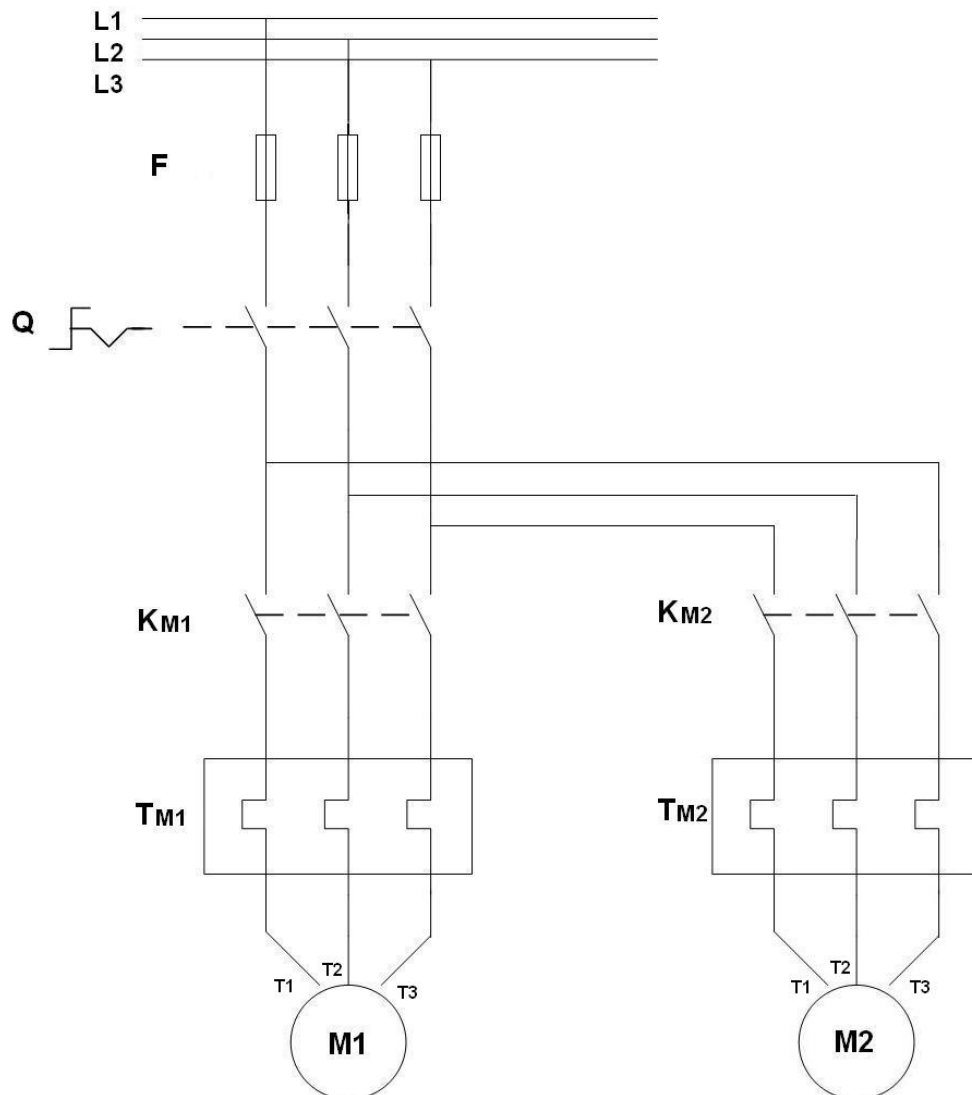
Tamaño NEMA	Corriente máxima (A)	Voltaje (V)	Potencia máxima (hp)
00	9	200	1 1/2
		230	1 1/2
		460 / 575	2
0	18	200	3
		230	3
		460 / 575	5
1	27	200	7 1/2
		230	7 1/2
		460 / 575	10
2	45	200	10
		230	15
		460 / 575	25
3	90	200	25
		230	30
		460 / 575	50
4	135	200	40
		230	50
		460 / 575	100
5	270	200	75
		230	100
		460 / 575	200
6	540	200	150
		230	200
		460 / 575	400
7	810	200	-
		230	300
		460 / 575	600

Fuente: Fink, Donald y Beaty, Wayne, **Manual de ingeniería eléctrica**, Pág. 20-71.

Otro tipo de dispositivo arrancador de voltaje directo para un motor trifásico lo constituye un arreglo sencillo que incluye 3 contactores para poner en marcha el motor, así como las protecciones mínimas necesarias para protegerlo contra daños. Es el dispositivo de arranque más sencillo y económico.

El arreglo necesario para conectar un motor **M** directo a la red se muestra en la figura 4, en la cual se pueden observar los fusibles **F**, un interruptor trifásico general **Q**, además del contactor **K** y relé térmico **T**.

Figura 4. Circuito de potencia del arranque directo de motores trifásicos

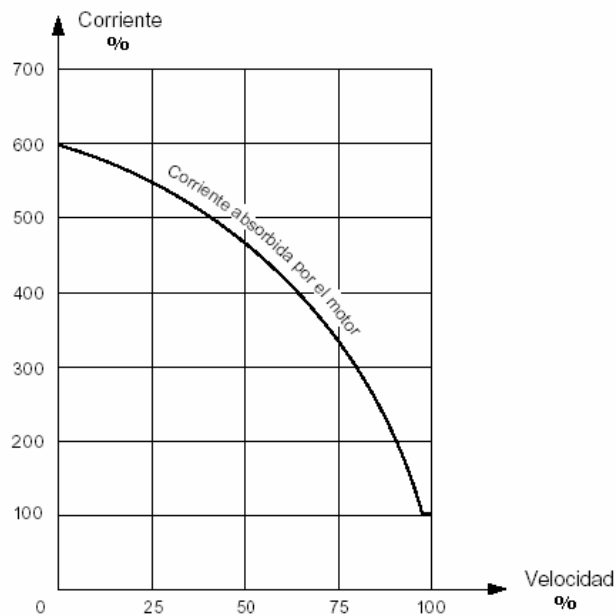


Fuente: Mroczkowski, Robert. **Electric connector handbook: Technology and applications**, Pág. 105.

3.2.1.2 Curva de corriente de arranque

La curva que se muestra en la figura 5 muestra la característica de la corriente de arranque de un motor conectado directamente a las líneas de voltaje. Se puede observar que la corriente que absorbe el motor en el instante en el cual su velocidad vale cero es muy alta y decrece en forma no lineal conforme la velocidad aumenta. Este efecto se produce debido a que en el inicio, cuando el motor se energiza, se debe vencer la inercia de la carga mecánica que tiene conectada a su eje. Una vez vencida la inercia conforme el motor se acerca a su velocidad nominal, la corriente del mismo disminuye hasta alcanzar su valor nominal bajo carga.

Figura 5. Curva de corriente contra velocidad del arranque directo



Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 29.

3.2.1.3 Ventajas

Sencillez del circuito. Debido a que únicamente se trata de meter o sacar de servicio el motor, el equipo mínimo necesario son los contactores o el arrancador electromagnético NEMA y protecciones de sobrecarga.

Elevado par de arranque. Como el motor está conectado directamente a la red, éste recibe todo el voltaje y por lo tanto se genera un alto par de arranque en el eje del motor.

Arranque rápido. El tiempo de arranque es intrínseco del motor, ya que no depende de ninguna transición para llegar al voltaje nominal.

Bajo costo inicial. El costo de contactores o arrancadores electromagnéticos NEMA es relativamente bajo al compararlo con otro tipo de dispositivos de arranque.

3.2.1.4 Desventajas

Mantenimiento del dispositivo arrancador. Los contactores al estar expuestos a grandes corrientes durante el arranque, sufren desgaste lo cual requiere un mantenimiento constante.

Reemplazo de contactos. El reemplazo de contactos debido al desgaste genera tiempos muertos en etapas de producción.

No hay control del par. No es posible controlar el par de arranque de un motor conectado directamente a las líneas de voltaje, ya que éste es un valor que depende de la construcción del motor.

Altos picos de corriente de arranque. El arrancador conecta el motor directamente a la línea, con lo que se aplica todo el voltaje a las terminales del devanado estático y éste absorbe gran cantidad de corriente de la red.

Requiere instalación de reductores. Cuando se conecta un motor con arranque directo, el alto par de arranque que desarrolla podría dañar la carga mecánica que se encuentra conectada en él. Para evitar el arranque brusco que podría ocasionar daños, es necesaria la instalación de cajas reductoras para que éstas absorban el golpe inicial del arranque.

3.2.2 Arranque a voltaje reducido

Los arranques de motores conectados directamente a las líneas de potencia son los más comunes, sin embargo, existen los denominados métodos de arranque a voltaje reducido, cuyo funcionamiento se caracteriza por controlar las corrientes de arranque y limitarlas a valores que no afectan las mediciones de demanda máxima. El método consiste en producir, en el momento del arranque, una tensión menor que la nominal en los devanados del motor. Al reducirse la tensión se reduce la corriente, la intensidad del campo magnético y el par desarrollado. En algunos métodos de arranque, como el estrella-delta o el autotransformador, la corriente y el par se reducen de manera proporcional, mientras que en otros métodos de arranque, como los arrancadores electrónicos, el par cambia con el cuadrado de la corriente.

3.2.2.1 Arranque estrella-delta

El método más simple para reducir el voltaje de un motor consiste en conectarlo inicialmente en estrella y cuando se ha alcanzado una velocidad cercana a la nominal, se cambia la conexión del motor a delta.

La tensión final sobre cada devanado del motor debe ser su propia tensión nominal. Este procedimiento es uno de los más económicos, pero es necesario disponer de un sistema adecuado de tensiones que permita la conexión delta del motor durante el régimen permanente. El cambio de conexión se realiza cuando el motor alcanza el deslizamiento de operación en la conexión estrella. La orden de cambio puede ser dada por un temporizador o de forma manual en el tiempo de aceleración a tensión reducida. Si el cambio de conexión se realiza antes de que las corrientes disminuyan, el arrancador pierde efectividad. El tiempo total de arranque con este dispositivo es aproximadamente tres veces mayor que el arranque en directo de la máquina. Esto es importante al momento de especificar las protecciones del motor.

Este tipo de arranque es uno de los procedimientos más empleados para el arranque de motores a tensión reducida, debido a que su construcción es simple y su precio reducido. Debido a la relación de voltaje en las configuraciones estrella y delta respectivamente, es posible aplicar el 57 por ciento del voltaje a los devanados en el primer paso (estrella) y el 100 por ciento del voltaje en el segundo paso (delta), según las ecuaciones siguientes:

Ecuación 3:

$$V_Y = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = 0.57 * V_L$$

Donde:

- V_Y : Voltaje en el motor conectado en estrella.
- V_L : Voltaje de línea del motor.

Ecuación 4:

$$V_{\Delta} = V_L$$

Donde:

- V_{Δ} : Voltaje en el motor conectado en delta.
 V_L : Voltaje de línea del motor.

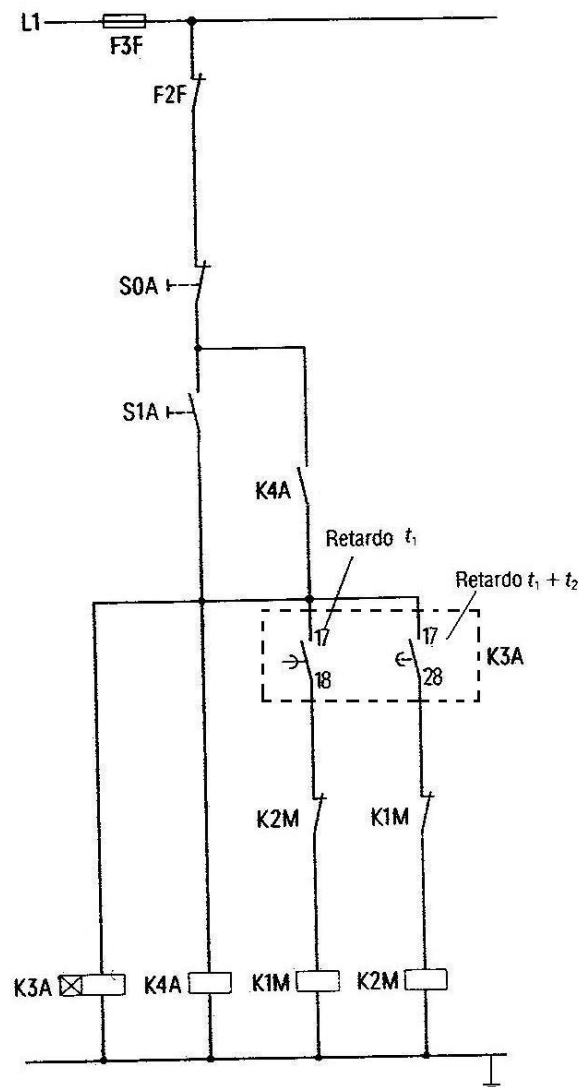
El procedimiento para reducir la tensión en el arranque consiste en conmutar las conexiones de los devanados en los motores trifásicos previstos para trabajar conectados en delta en la red. Los devanados inicialmente se conectan en estrella, es decir, reciben la tensión de fase, y luego se conectan en delta a la tensión de línea. La tensión durante el arranque se reduce el 57 por ciento. Por ser ésta una relación fija, y dado que la influencia de la tensión sobre la corriente y el par es cuadrática, tanto la corriente como el par de arranque del motor se reducen tres veces. La conmutación de estrella a delta generalmente se hace en forma automática luego de transcurrido un lapso (que puede regularse con un relé de tiempo) en el que el motor alcanza determinada velocidad.

3.2.2.1.1 Dispositivo

Existen dos tipos de arrancadores estrella-delta: los de transición abierta y los de transición cerrada. En la figura 6 se muestra el circuito de mando, y en la figura 7, el circuito de potencia del arrancador estrella-delta de transición abierta, de esta forma, para la conexión del motor, se observa en la figura 6, que el pulsador S1A activa el relé de tiempo K3A y energiza la bobina del contactor auxiliar K4A. El contacto de autorretención de K4A cierra y conecta el contactor estrella K1M a través del contacto normalmente abierto 17/18 de actuación instantánea del relé de tiempo K3A. De esta forma, el motor arranca en conexión estrella.

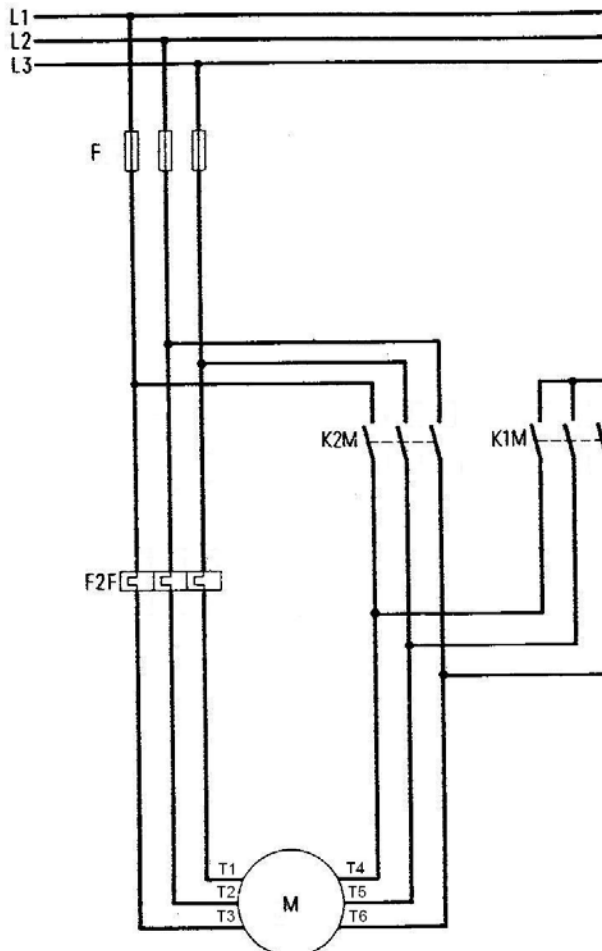
Luego de transcurrir el tiempo de retardo ajustado t_1 , se abre el contacto normalmente abierto 17/18 del relé de tiempo K3A y desconecta el contactor estrella K1M. Después de transcurrir el tiempo de retardo t_1+t_2 , se cierra el contacto normalmente abierto 17/28 de K3A, el cual conecta el contactor delta K2M, con lo cual el motor marcha ahora en conexión delta.

Figura 6. Circuito de mando de un arrancador estrella-delta con transición abierta.



Fuente: Schmelcher, Theodor. **Manual de baja tensión**, Pág. 278.

Figura 7. Circuito de potencia de un arrancador estrella-delta con transición abierta.



Fuente: Schmelcher, Theodor. **Manual de baja tensión**, Pág. 279.

El arranque estrella-delta reduce de 3 a 4 veces la corriente durante el arranque, ya que el voltaje pleno se aplicará una vez el motor haya dejado de acelerar. Sin embargo, se da una corriente de irrupción transitoria como resultado de la desconexión temporal del motor en la conmutación de estrella a delta. Por ser la forma más económica de arranque a voltaje reducido, la conmutación con transición abierta es el método más utilizado de arranque estrella-delta.

Debido a la interrupción de voltaje momentánea, la corriente del estator se vuelve cero mientras la corriente del rotor sigue circulando, con lo cual se induce un voltaje en el estator, el cual tiene una frecuencia menor que el voltaje de línea. Por lo tanto, las relaciones de fases con la línea están cambiando constantemente. El pico de corriente resultante durante la conmutación de estrella a delta depende de la relación de fase entre los dos voltajes en el instante del cambio, observándose el máximo cuando los dos voltajes están fuera de fase. El valor máximo de corriente durante la conmutación puede alcanzar valores de 20 veces la corriente nominal.

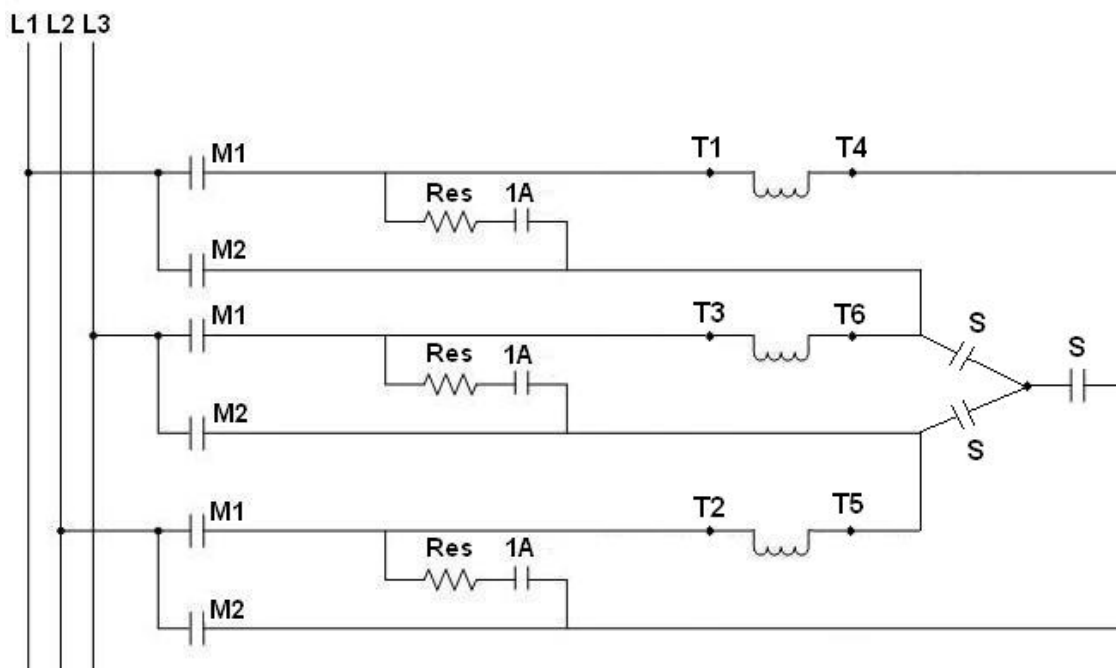
Figura 8. Panel de un arrancador estrella-delta con transición abierta



Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 34.

El arrancador estrella-delta de transición cerrada soluciona los problemas de picos de corriente generados por los circuitos de transición abierta, y consiste en adicionar al de transición abierta el uso de componentes en el circuito arrancador, los cuales conectan temporalmente componentes de tipo resistivos o reactivos a través de los devanados. Esto asegura que el motor permanezca conectado a la fuente de alimentación mientras se da la conmutación de estrella a delta.

Figura 9. Circuito de potencia del arranque estrella-delta con transición cerrada.



Fuente: Fink, Donald y Beaty, Wayne, Manual de ingeniería eléctrica, Pág. 20-75.

En el circuito de la figura 9, se energiza el contactor **S**, lo que hace que los devanados del motor se conecten en estrella. Se cierra un contacto auxiliar normalmente abierto que está en el contactor **S**, con lo que se cierra el contactor **M1**, se cierran sus contactos y se energizan los devanados del motor en estrella. Después de un intervalo predeterminado, se energiza el contactor **1A**, lo que conecta los resistores **Res** en estrella y los pone en paralelo a través del devanado del motor conectado en estrella. Se abre un contacto auxiliar normalmente cerrado que está en el contactor **1A** y se desenergiza el contactor **S**, se abren sus contactos y se colocan los resistores **Res** en serie con el devanado del motor. El motor queda ahora conectado en delta.

Luego, se abre un contacto auxiliar normalmente cerrado que está en el contactor **S** y se energiza el contactor **M2**, lo que hace que se cierren sus contactos y, en consecuencia, corta los resistores **Res**. El motor conectado en delta queda ahora energizado a pleno voltaje.

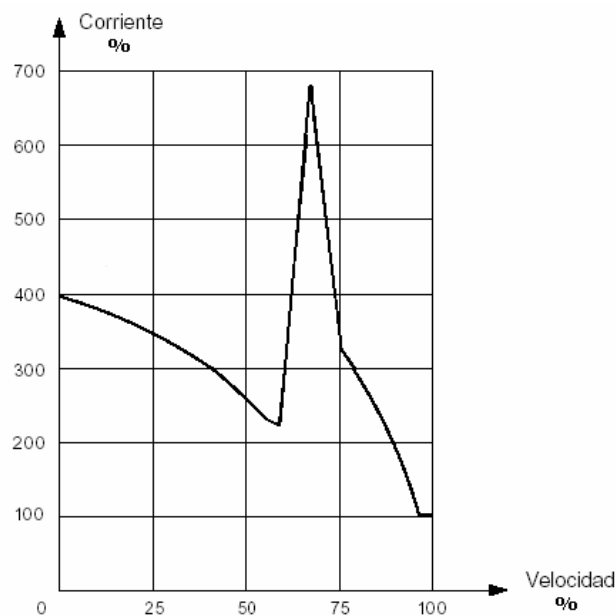
Con la conmutación con transición cerrada se disipa mucha energía en forma de calor en los resistores de transición, y requiere espacio adicional elevando el costo total del arrancador, debido a eso, no es muy utilizado este tipo de arranque.

3.2.2.1.2 Curva de corriente de arranque

La característica del arrancador estrella-delta es la disminución de la corriente de arranque en el motor cuando éste se energiza, lo cual se logra debido a la disminución del voltaje en sus terminales en la primera fase del arranque.

Es posible observar en la figura 10 que la corriente, cuando el motor tiene velocidad cero, es menor que la que se presenta en un arranque directo, sin embargo, en la transición de estrella a delta, cuando el motor queda desconectado temporalmente de la red, se produce un pico de corriente momentáneo mientras se vuelve a conectar el motor, ahora en configuración delta, con lo cual se aplica la tensión nominal a las terminales del motor para su funcionamiento.

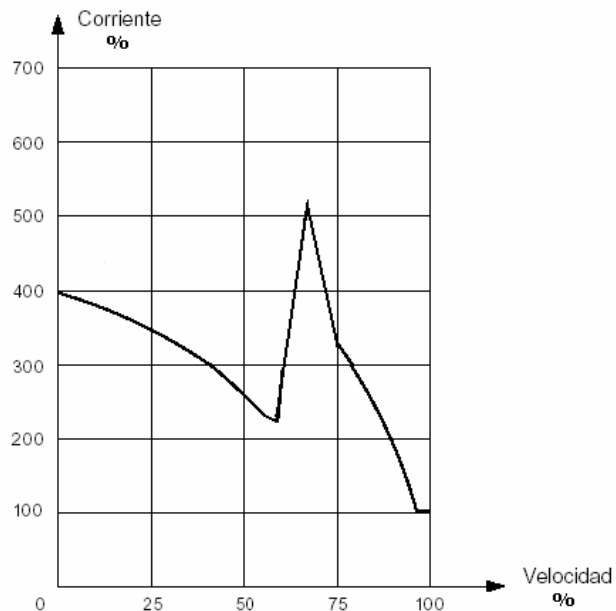
Figura 10. Curva de corriente contra velocidad del arranque estrella-delta con transición abierta.



Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 45.

La figura 11 muestra la curva de corriente contra velocidad del arranque estrella-delta con transición cerrada. Es posible observar que el pico de corriente durante la transición estrella a delta disminuye respecto a la operación del arrancador con transición abierta.

Figura 11. Curva de corriente contra velocidad del arranque estrella-delta con transición cerrada.



Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 45.

3.2.2.1.3 Ventajas

Las ventajas que presenta el arranque estrella-delta son similares a las del arranque directo, ya que no se necesita gran cantidad de equipo, únicamente contactores y relés.

Bajo costo inicial. El costo del arranque estrella-delta se incrementa, respecto al arranque directo, debido a que se usa una mayor cantidad de contactores y de relés; sin embargo, el costo final del arrancador es relativamente bajo.

Sencillez del circuito. Es un circuito formado por contactores y relés para llevar a cabo el arranque.

3.2.2.1.4 Desventajas

Diseño especial del motor. El motor accionado por un arrancador estrella-delta debe tener el devanado en dos partes y tener accesibles sus 6 terminales para poder hacer la conexión.

Pico de transición. La transición de circuito abierto genera un transitorio de corriente que se puede evitar con una modificación al circuito para convertirlo en transición cerrada, con lo cual se mantiene conectado el motor a la red en todo momento pero se disipa gran cantidad de potencia en forma de calor en las resistencias durante la transición. Además, con la transición cerrada se incrementa el tamaño y costo del arrancador.

Mantenimiento del dispositivo arrancador. Los contactores sufren desgaste debido al pico de transición que se presenta momentáneamente durante el cual circula una gran cantidad de corriente a través de ellos y disminuye su vida útil.

Reemplazo de contactos. El reemplazo de contactos debido al desgaste genera tiempos muertos en etapas de producción.

Disminución del par. El par de arranque del motor se ve disminuido debido a la reducción del voltaje en sus terminales, y el mismo podría ser insuficiente para arrancar motores con grandes momentos de inercia.

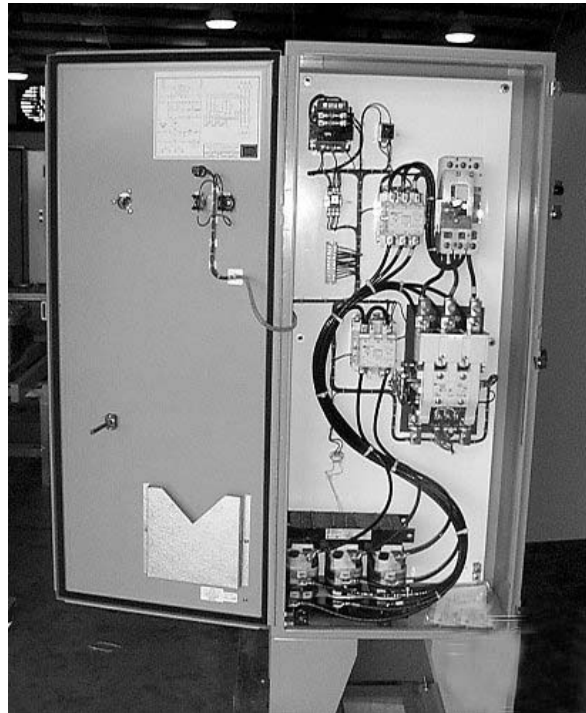
Necesaria instalación de reductor. Cuando se conecta un motor con arranque estrella-delta, el pico de transición que se produce durante la conmutación genera un alto par, el cual podría dañar la carga mecánica que se encuentra conectada en él. Para evitar que el transitorio mecánico ocasione daños es necesaria la instalación de cajas reductoras para que éstas absorban el golpe del transitorio.

3.2.2.2 Arranque por autotransformador

Este tipo de arranque se basa en el mismo principio de operación que el arranque estrella-delta, que consiste en disminuir el voltaje en las terminales del motor durante el arranque y conmutar a voltaje pleno cuando el motor ha dejado de acelerar. La mejora que presenta este tipo de arranque respecto al estrella-delta es el hecho de que la tensión reducida en el arranque se logra mediante bobinas auxiliares que permiten aumentar la tensión en forma escalonada, dependiendo de las necesidades de arranque en la aplicación. Se conectan dos de los tres devanados del motor a los secundarios de dos autotransformadores durante el arranque. Dichos autotransformadores poseen un cambiador de derivaciones (tap) para seleccionar el voltaje aplicado al motor durante el arranque en 50%, 65%, 80% o el 100% del voltaje pleno. Para que el arranque se produzca de forma automática, es necesaria la adición de un circuito con contactores y relés.

A diferencia del arranque estrella-delta, en el cual la corriente y el par quedan reducidos a un 33 por ciento respecto a la corriente de arranque a voltaje directo, el autotransformador permite obtener los valores que interesen con solo fijar la relación conveniente del tap. Sin embargo, no debe reducirse en exceso la corriente de arranque, ya que daría lugar a un pico elevado de corriente al aplicar la plena tensión de la red durante la conmutación.

Figura 12. Panel de un arranque por autotransformador



Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 49.

Es usual utilizar una tensión secundaria del 65 por ciento, y en estas condiciones, la corriente absorbida por el motor en el secundario del autotransformador varía en forma directa con el voltaje aplicado a sus terminales. Por lo tanto, dicha corriente también queda reducida al 65 por ciento, lo que genera que en el devanado primario se obtenga una corriente de $0,65 \times 0,65 = 0,42$, debido a que la corriente de línea varía en forma proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, es decir el 42 por ciento en relación de la corriente de arranque directo. En otras palabras, se obtiene una corriente del 42 por ciento en la red respecto a la corriente de arranque directo, mientras que en los terminales del motor la corriente tiene un valor del 65 por ciento lo cual ayuda a un mejor arranque. En la tabla II se muestra de mejor manera la diferencia entre estos dos tipos de arranque.

Tabla II. Relación entre el voltaje aplicado a las terminales del motor y la corriente para diferentes tipos de arranque.

Voltaje aplicado	Corriente de línea en la red*			Corriente del motor*		
	Directo	Estrella Delta	Autotransformador	Directo	Estrella Delta	Autotransformador
33%	-	33%	-	-	33%	-
50%	-	-	25%	-	-	50%
65%	-	-	42%	-	-	65%
80%	-	-	64%	-	-	80%
100%	100%	-	100%	100%	-	100%

* Los valores de corriente están referidos a los valores de la corriente de arranque a voltaje directo.

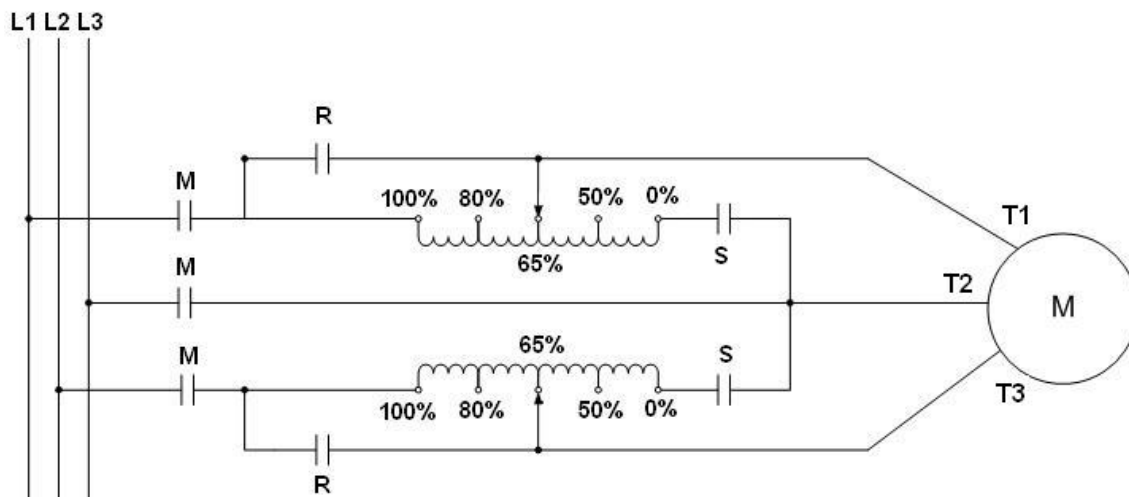
3.2.2.2.1 Dispositivo

Este tipo de arranque tiene dos autotransformadores conectados en delta abierta para dar lugar a un arranque con voltaje reducido tal como se muestra en la figura 13, en cuyo caso tiene el tap al 65 por ciento.

El circuito arrancador consiste en un contactor principal de tres polos **M** y los contactores de arranque **S** y de marcha **R**. Al oprimir el botón de marcha, el contactor de arranque se cierra, con lo que se conecta el autotransformador a la línea y el motor a las tomas de voltaje reducido. El contactor de arranque hace funcionar un relé de tiempo. El motor se acelera y después de un número especificado de segundos los contactos del contador de tiempo se cierran, con lo que se desenergiza el contactor de arranque **S** y se energiza el de marcha **R**. El autotransformador se desconecta y el motor se conecta al voltaje de línea. Las características de este tipo de arrancador son baja corriente de línea, baja potencia de la línea y un bajo factor de potencia.

La aceleración no es continua, debido a que el par desarrollado por el motor permanece prácticamente constante durante el periodo de arranque (primer paso), a continuación cambia a otro valor (segundo paso). Durante la transición, cuando el contactor **S** se abre, los autotransformadores actúan como reactores en serie hasta que se cierra el contactor **R**, lo cual, al igual que en el arranque estrella-delta, provoca un pico de corriente.

Figura 13. Circuito de potencia del arranque por autotransformador



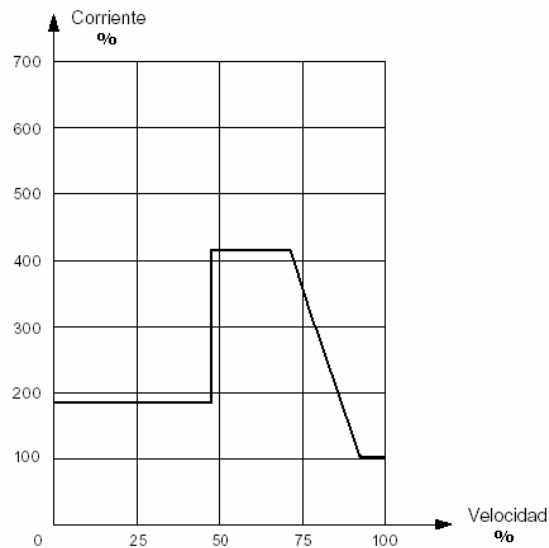
Fuente: Fink, Donald y Beaty, Wayne, **Manual de ingeniería eléctrica**, Pág. 20-73.

Los autotransformadores de arranque más modernos están equipados con relés de protección de estado sólido, y la transición entre los contactores **S** y **R** puede ser efectuada con base en la corriente que detecta el relé electrónico en lugar de hacerlo con un temporizador.

3.2.2.2 Curva de corriente de arranque

El arranque por autotransformador tiene la ventaja de consumir poca corriente de arranque en su primera etapa, como se puede apreciar en la figura 14, ya que el voltaje aplicado en ese instante es bajo en relación con el voltaje nominal debido al efecto del autotransformador. Sin embargo, durante la transición a voltaje pleno, la corriente aumenta bruscamente durante algunos ciclos, luego disminuye hasta que se estabiliza y llega a los valores típicos de corriente nominal.

Figura 14. Curva de corriente contra velocidad del arranque por autotransformador con tap al 65 por ciento.



Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 52.

3.2.2.3 Ventajas

Eficiencia. Provee la mayor cantidad de par de arranque por amperio consumido de la red.

Flexibilidad. Posee tres derivaciones en el secundario del autotransformador para adecuarse a las necesidades de arranque de la aplicación.

Control. Se tiene mayor control sobre el par de arranque, debido a los diferentes valores que se pueden obtener con el cambiador de derivaciones.

Conexión. Este tipo de arranque se puede implementar en un motor que tenga tres terminales de salida.

3.2.2.2.4 Desventajas

Pico de transición. Las conmutaciones en las etapas se realizan bruscamente lo cual genera un transitorio de corriente.

Mantenimiento del dispositivo arrancador. Los contactores sufren desgaste debido al pico de transición que se presenta momentáneamente durante el cual circula una gran cantidad de corriente a través de ellos y disminuye su vida útil.

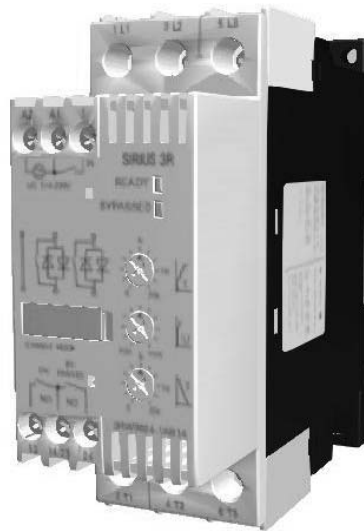
Reemplazo de contactos. El reemplazo de contactos debido al desgaste genera tiempos muertos en etapas de producción.

Tamaño. El tamaño físico del arrancador es grande en relación con los demás tipos de arranque. Se debe instalar en un panel eléctrico para su seguridad.

3.2.2.3 Arranque suave

Con el desarrollo de la electrónica de potencia y de la microelectrónica, los dispositivos que funcionan con base en microprocesadores trabajan a mayores velocidades, aportan más y mejores características en un tamaño y peso reducidos debido al uso de componentes de estado sólido en circuitos electrónicos complejos. Muchas ramas de la industria se ven beneficiadas con el adelanto de la tecnología en este campo, el arranque de motores es una de ellas. Los arranques electrónicos surgen como una solución confiable, rentable económicamente y libre de mantenimiento para las aplicaciones industriales.

Figura 15. Arrancador suave



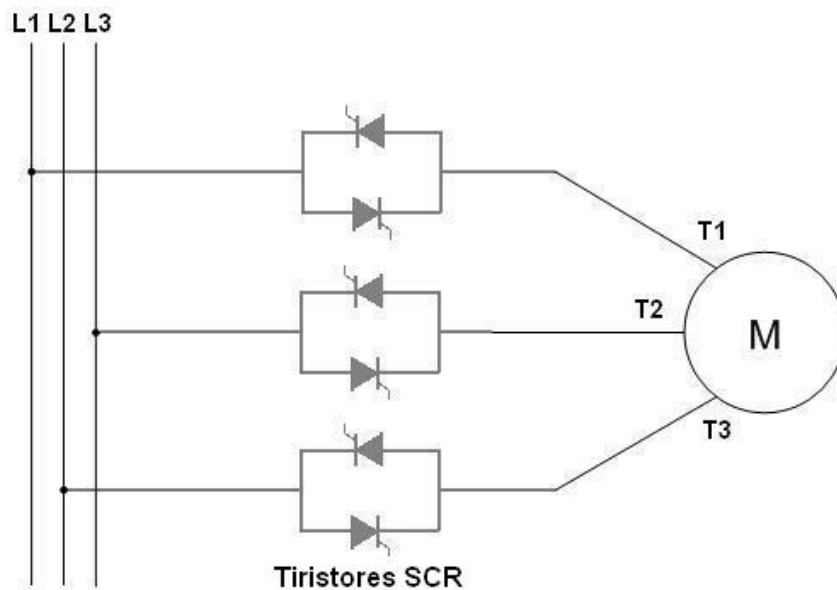
Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 5.

Un arrancador electrónico es un convertidor de energía, el cual modula la energía eléctrica suministrada al motor y se usa únicamente en motores asíncronos o de inducción. Consta de un par de tiristores SCR en oposición por cada línea conectada al motor.

El arreglo de seis tiristores SCR en un motor trifásico controla la potencia eléctrica durante el arranque ya que sólo una porción de la onda senoidal de AC es suministrada al mismo, según la programación realizada en el circuito de maniobra, la cual irá aumentando hasta alcanzar los valores nominales de tensión. El arrancador posee contactores de *bypass* los cuales conectan el motor directamente a la red una vez que éste alcanza su velocidad nominal, esto es para evitar el sobrecalentamiento de los tiristores SCR. Este arranque progresivo también se puede utilizar para detener el motor, de manera que vaya reduciendo la tensión hasta el momento de la detención.

3.2.2.3.1 Dispositivo

Figura 16. Circuito de potencia simplificado del arranque suave con conexión directa.



Fuente: Fink, Donald y Beaty, Wayne, **Manual de ingeniería eléctrica**, Pág. 20-75.

Un arrancador suave puede ser instalado de dos formas: de forma directa al motor o dentro del lazo delta de un motor de 6 terminales. La conexión directa se realiza cuando se instala un arrancador suave en un motor trifásico de 3 terminales, como se ve en la figura 16.

Cuando se desea instalar el arrancador en un motor con 6 terminales, entonces se realiza la conexión dentro de la delta, la cual consiste en conectar los tiristores SCR del arrancador suave en serie con sus correspondientes fases del motor.

En este caso, el arrancador lleva únicamente el 57% de la corriente del motor ya que en conexión delta, la corriente es igual a 0.57 veces la corriente de línea, según se aprecia en la ecuación 5.

Ecuación 5:

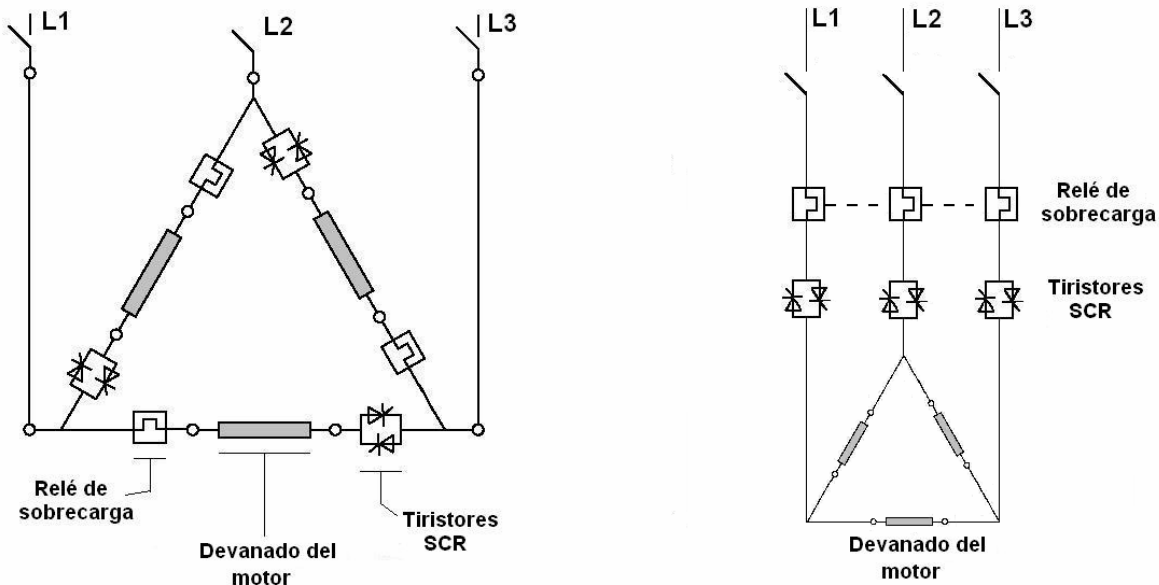
$$I_Y = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = 0.57 * I_L$$

Donde:

- I_{Δ} : Corriente en el motor conectado en delta.
- I_L : Corriente de línea del motor.

Por lo tanto, el tamaño del mismo es más reducido que el de una conexión directa. La figura 17 indica el circuito de conexión dentro de la delta.

Figura 17. Circuito de potencia simplificado del arranque suave con conexión dentro de la delta.



Fuente: **Electronic starters and variable speed drives (Cahiers techniques)**, Pág. 13.

Los arrancadores electrónicos se componen básicamente de dos módulos, los que usualmente están contenidos en una misma unidad: uno de control que maneja la operación del dispositivo y otro de potencia que suministra la potencia al motor en forma de energía eléctrica.

3.2.2.3.1.1 Módulo de control

En los arrancadores suaves modernos, todas las funciones están controladas por microprocesadores, los cuales utilizan los ajustes que se realizaron durante la instalación. Así mismo, junto con circuitos dedicados, las funciones de cálculo del microprocesador han hecho posible que se realicen algoritmos de control de alta eficiencia para que reconozca las características del motor que controlan.

El microprocesador utiliza esta información para manejar las rampas de aceleración o desaceleración, para limitar corriente, velocidad y par, así como también para controlar los componentes de potencia.

Los límites de velocidad, perfiles de rampa, límites de corriente y otros ajustes se definen utilizando las manecillas de ajuste o el puerto de entrada para computadora. Los parámetros de operación así como datos de falla y alarma se despliegan en la pantalla principal del arrancador. El voltaje requerido para las mediciones y circuitos de control se suministran por medio de una fuente de poder integrada al arrancador y eléctricamente aislada de la línea de potencia.

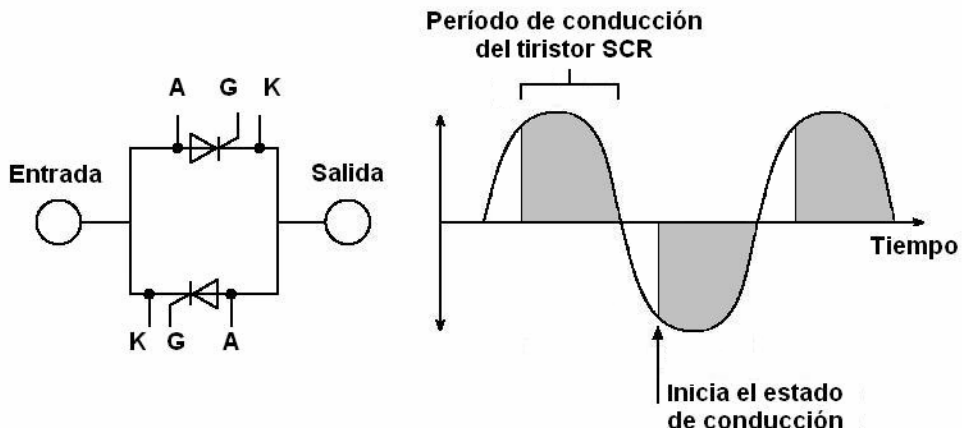
3.2.2.3.1.2 Módulo de potencia

Los componentes principales del módulo de potencia son los componentes de potencia tales como diodos, tiristores SCR, transistores, las interfases de medición de voltaje y corriente y usualmente un ventilador. Los componentes de potencia han sido la clave para el desarrollo de los arrancadores suaves debido a sus mejoras en funcionamiento y costo.

El tiristor SCR es un dispositivo electrónico formado por cuatro capas de material semiconductor el cual posee tres entradas: ánodo A, cátodo K y puerta G. La puerta es la encargada de controlar el paso de corriente entre el ánodo y el cátodo. Funciona básicamente como una válvula electrónica, es decir, permite a la corriente circular en un solo sentido. Mientras no se aplique ninguna tensión en la puerta del tiristor SCR no se iniciará la conducción y en el instante en que se aplique dicha tensión, el tiristor SCR entrará en su estado de conducción y comenzará a conducir corriente eléctrica. Una vez arrancado, podemos anular la tensión de puerta y el tiristor SCR continuará conduciendo hasta que la corriente de carga pase por cero, es decir, cada medio ciclo de AC.

El arrancador suave trabaja al incrementar gradualmente la rampa de tiempo, o lo que es lo mismo, el ángulo de fase para los cuales el tiristor SCR entrará en su estado de conducción. El voltaje aplicado al motor se incrementa según la rampa de tiempo configurada hasta que alcanza el voltaje pleno en las terminales del motor. La figura 18 muestra la configuración de un circuito de dos tiristores SCR en oposición en una línea de 2 hilos AC.

Figura 18. Configuración de un arreglo de 2 tiristores SCR y sus estados de conducción en una línea de dos hilos AC



Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 5.

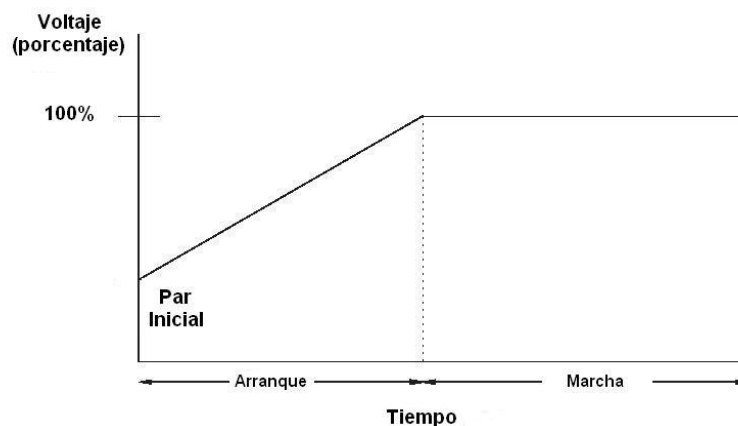
3.2.2.3.2 Modos de operación

La gran ventaja de los arrancadores suaves es la variedad de parámetros que se pueden controlar durante el arranque ya que se pueden tener distintas variantes en su uso, debido a las características de control que brinda la modulación de la energía a través de componentes de estado sólido. A continuación se describen los principales modos de operación en que se pueden programar los arrancadores suaves, así como sus principales características y formas de funcionamiento.

3.2.2.3.2.1 Arranque suave

Este modo de operación cubre la mayoría de aplicaciones generales. Se le da al motor un valor de par inicial, tal como se aprecia en la figura 19, el cual es ajustable entre 0 y 90 por ciento del par a voltaje pleno. Desde el nivel de par inicial, el voltaje que el arrancador entrega al motor se incrementa gradualmente durante el tiempo que dure de la rampa de aceleración, el cual también es ajustable entre 0 y 30 segundos.

Figura 19. Característica del modo de arranque suave



Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 62.

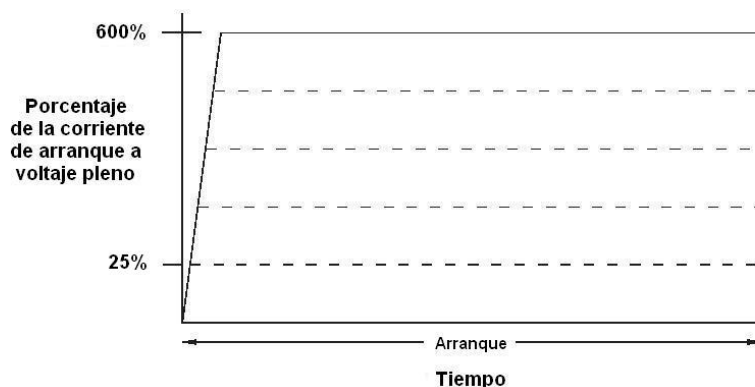
3.2.2.3.2.2 Corriente limitada

Este modo de arranque provee una corriente de arranque limitada, y se utiliza cuando es necesario tener bajo control los niveles de corriente que se toman de la red eléctrica para mantener controlada la potencia máxima demandada por la instalación. La corriente de arranque es ajustable entre el 25 y el 600 por ciento de la corriente de arranque a voltaje pleno, y el tiempo de arranque se puede seleccionar entre 0 y 30 segundos.

Si el motor no ha alcanzado su velocidad de régimen una vez terminado el tiempo predefinido, el controlador hará una transición a voltaje pleno. Si se limita la corriente a un valor menor al 25 por ciento, el motor no arrancará.

En este modo de arranque se puede obtener una disminución en la potencia máxima consumida por la instalación, ya que se reducirá la corriente de arranque del motor a un valor con el cual sea posible el arranque satisfactorio de la carga mecánica y al mismo tiempo no se sobrepase el valor de demanda máxima para reducir los costos por concepto de demanda máxima.

Figura 20. Característica del modo de arranque con corriente limitada



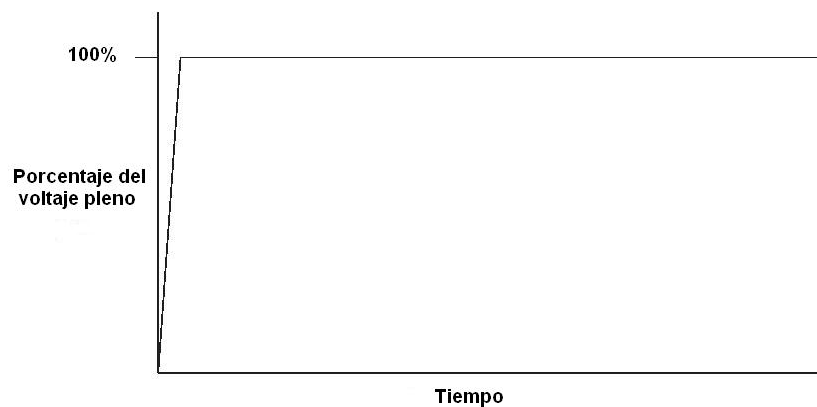
Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 62.

3.2.2.3.2.3 Voltaje pleno

Este otro modo de arranque se utiliza en aplicaciones que requieren un arranque directo de la red eléctrica en el cual el arrancador actúa como un contactor de estado sólido. Con este modo se alcanza la máxima corriente de arranque y el máximo par de arranque en el motor. Se puede programar el arrancador para que provea un arranque a voltaje pleno en 0.25 segundos.

La figura 21 muestra la curva de corriente contra tiempo de un arrancador suave con el modo de arranque a voltaje pleno, en el cual se puede observar que el motor arranca con el 100 por ciento del voltaje nominal en sus terminales. La rampa de tiempo para que el voltaje en las terminales del motor sea el voltaje nominal se puede ajustar entre 0.25 y 1.5 segundos.

Figura 21. Característica del modo de arranque a voltaje pleno



Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 63.

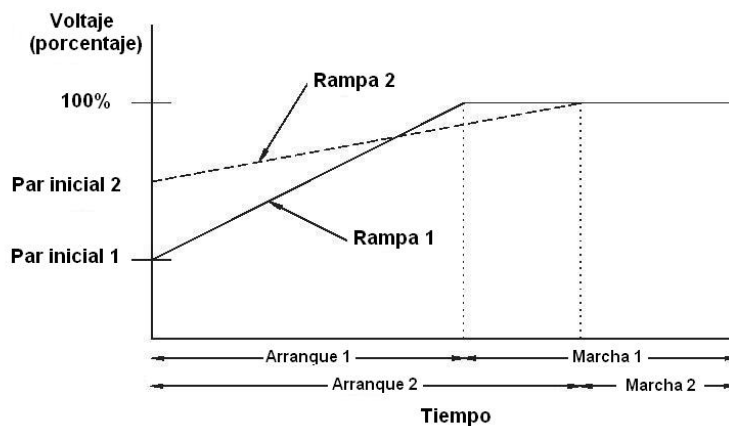
3.2.2.3.2.4 Doble rampa

Este otro modo de arranque es útil en aplicaciones de cargas variables, con requerimientos de par de arranque y tiempo de arranque establecido.

El arranque con doble rampa ofrece la flexibilidad de seleccionar entre dos diferentes perfiles de arranque suave con distintas rampas de tiempo y ajustes de par inicial. Los tiempos de la rampa de aceleración se pueden programar de 0 a 30 segundos, mientras que los valores de par inicial pueden ser entre 0 y 90 por ciento del valor del par a pleno voltaje.

En la figura 22 se observa la configuración de un arrancador suave en el modo de doble rampa para un motor en el cual la carga mecánica uno es menor que la carga mecánica dos; la rampa uno provee un arranque más rápido que el arranque de la rampa dos, el cual es más lento debido a la carga con la cual debe arrancar.

Figura 22. Característica del modo de arranque a doble rampa



Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 62.

3.2.2.3.2.5 Arranque *kickstart*

El modo de arranque *kickstart* consiste en una configuración que permite alcanzar un pico de corriente al inicio del arranque para vencer la inercia de la cargas del motor.

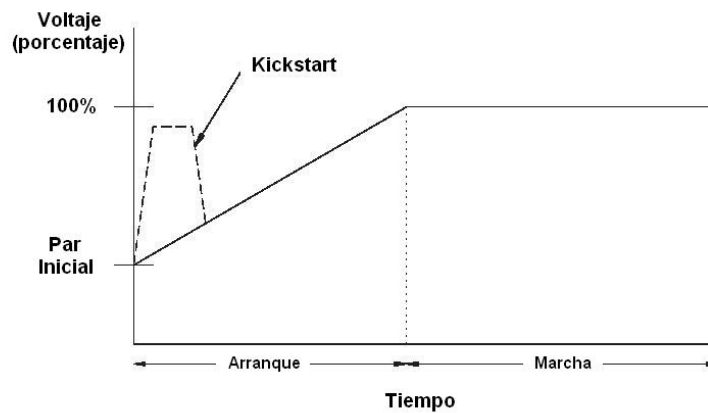
Esta opción brinda un aumento repentino en la característica de arranque para mover cargas mecánicas de gran inercia, ya que provee un pulso de corriente ajustable entre 0 y 90 por ciento del valor a voltaje pleno durante un período de tiempo ajustable entre 0.0 y 2.0 segundos.

La opción *kickstart* se puede combinar con los modos de arranque:

- a) Arranque suave
- b) Corriente limitada
- c) Doble rampa

Por ejemplo, se puede utilizar el modo arranque suave con *kickstart* para vencer la inercia que presenta una carga mecánica durante el arranque, y luego disminuir el valor de voltaje en las terminales del motor y aumentarlo progresivamente hasta que éste alcance su velocidad nominal como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Característica del arranque suave con *kickstart*



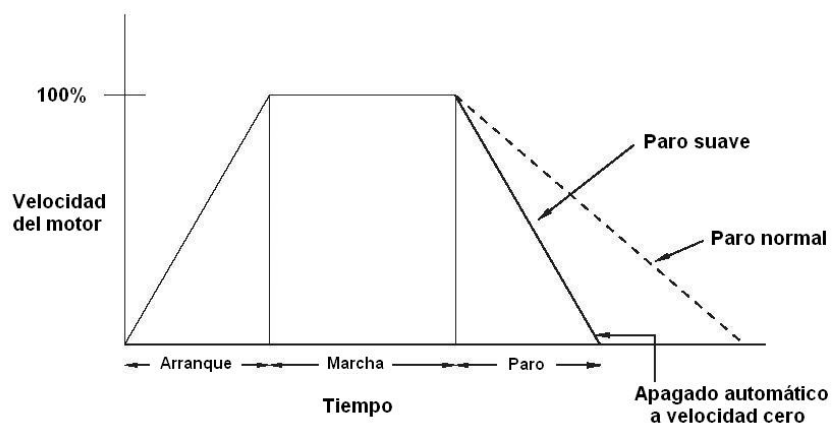
Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 62.

3.2.2.3.2.6 Paro suave

Aunque en este apartado se han analizado los más importantes modos de arranque, es del caso indicar que en aplicaciones en donde se requiere un tiempo extendido entre el apagado del motor y el reposo absoluto, es necesario contar con un modo de paro suave, el cual funciona de la siguiente manera; la rampa invertida de voltaje se puede ajustar entre 0 y 120 segundos y es completamente independiente del tiempo de arranque. La carga mecánica parará cuando el voltaje en las terminales del motor cae a un punto en el cual el par mecánico de la carga es mayor que el par del motor.

Al utilizar el paro suave se evitan transitorios mecánicos en las cargas, como el golpe de ariete durante el paro de bombas. Hay que tener precaución de no utilizar el paro suave como paro de emergencia.

Figura 24. Característica del paro suave



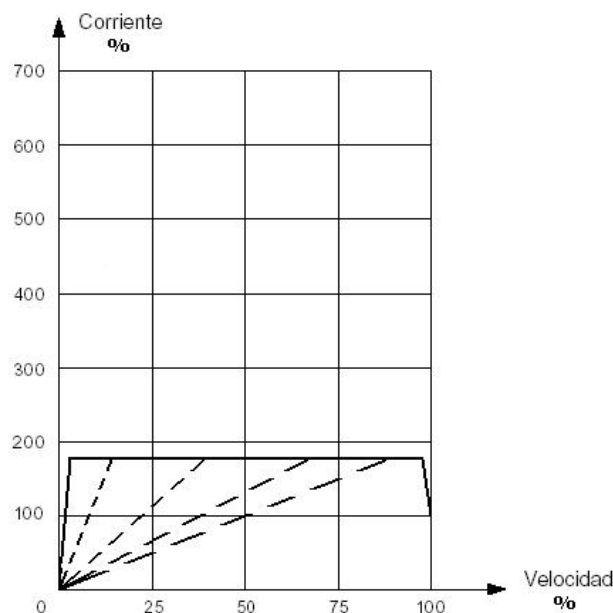
Fuente: **Smart choices for motor management**, Pág. 21.

3.2.2.3.3 Curva de corriente de arranque

Debido a la función de limitación de corriente, el arranque suave se puede configurar según la necesidad de par inicial de la aplicación.

En la figura 25 se muestra la característica de arranque de un arrancador suave en el modo de límite de corriente para distintos valores de tiempo de arranque. Se puede observar que la configuración del tiempo de arranque es independiente del límite establecido para la corriente del motor. De esta forma se obtiene, utilizando el mismo valor de corriente, un arranque más lento según sea la aplicación.

Figura 25. Curva de corriente contra velocidad del arranque suave con corriente limitada.



Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 68.

3.2.2.3.4 Ventajas

Los arrancadores suaves han desplazado a otros tipos de arrancadores debido a los beneficios que presentan en operación, mantenimiento y costo. A continuación se describen las principales ventajas de este tipo de arrancador.

Reducción de corriente de arranque. Con el uso de dispositivos de estado sólido y una compleja circuitería electrónica, los arrancadores suaves pueden disminuir la corriente de arranque de un motor y limitarla a un valor en el cual sea útil para vencer la inercia de la carga mecánica instalada.

Ahorro de energía. Al reducir la corriente de arranque de los motores, se atenúan los efectos dañinos que éstas producen; uno de ellos es la disminución de la demanda de potencia máxima en la instalación, con lo cual se disminuye el monto de la factura eléctrica.

Cargas mecánicas. Las cargas mecánicas conectadas al eje del motor se ven protegidas con el uso de un arrancador suave, ya que se reducen los pares de arranque excesivos o por pasos, los cuales podrían dañar o desgastar elementos mecánicos.

Instalación. Se necesita un cableado sencillo para nuevas instalaciones, así como para sustituir otro tipo de arranque. Debido a su tamaño reducido, ahorra espacio en los paneles de control.

Vida útil. Es un dispositivo de larga vida útil ya que ésta se prolonga debido al diseño del arrancador con contactor de *bypass*, el cual actúa cuando el motor llega a su régimen permanente y desconecta los tiristores SCR para evitar que circule corriente constantemente por ellos y se sobrecalienten.

Flexibilidad. El arrancador suave se puede adaptar a cualquier tipo de carga mecánica, ya que cuenta con diferentes modos de operación para adaptarse a los requerimientos de arranque de la aplicación de que se trate.

Adaptabilidad. El modo de doble rampa ofrece dos configuraciones simultáneas al arrancador para adaptarse a dos perfiles distintos de carga. Si con el paso del tiempo el motor cambia la carga conectada a él, no es necesario comprar otro arrancador, ya que el mismo puede configurarse de nuevo para adaptarse a la nueva carga instalada.

Mantenimiento. Debido a que posee una menor cantidad de partes móviles respecto a otro tipo de dispositivo arrancador, el arranque suave reduce el tiempo muerto de motores por mantenimiento, ya que su función de limitación de corriente permite que los dispositivos externos de control y protección como contactores, relevadores, etc. sufran menor desgaste, debido a que se reduce la corriente de arranque que circula a través de ellos.

Protecciones. Los arrancadores suaves tienen incorporadas protecciones de sobrecarga y asimetría, así como vigilancia del tiempo de arranque con limitación de corriente, control de servicio con inversión de marcha y protecciones contra falla de tiristores, lo cual reduce los costos de elementos adicionales de protección.

Facilidad de reemplazo. Los arrancadores suaves se pueden instalar en motores de 6 terminales, en sustitución de arrancadores estrella-delta previamente instalados, sin tener que modificar el circuito de arranque, evitando costos directos adicionales de recableado, lo que influiría en los costos de producción. El arrancador suave se conecta directamente a la sección delta del motor, utilizando el cableado existente del arrancador estrella-delta.

Automatización. Con el uso de arrancadores suaves en una instalación, el proceso de automatización se vuelve mas fácil, ya que éstos poseen puertos de comunicación para PLC.

3.2.2.3.5 Desventajas

Uso. Aunque un arrancador suave se puede usar para muchas aplicaciones, hay algunos casos en los cuales no se puede utilizar este tipo de arranque. Por ejemplo, si hay una aplicación en la cual se requiere que el par inicial sea tan grande como el par a voltaje pleno. Si el requerimiento del par inicial es demasiado alto, entonces no es aconsejable el uso de un arranque suave, el cual al disminuir el voltaje también disminuirá el par. Un ejemplo es en grúas de gran carga.

Armónicas. Al igual que la mayoría de dispositivos semiconductores, los tiristores SCR en oposición que contiene cada fase de alimentación del motor en un arranque suave generan armónicas, ya que los mismos se disparan de manera asimétrica, es decir, no entrarán a su estado de conducción con el mismo valor de voltaje de puerta en cada semiciclo de AC. Sin embargo, este tipo de configuración de tiristores SCR genera armónicas que se atenúan rápidamente, ya que la duración del arranque es limitada. La emisión armónica del arranque suave se presenta únicamente durante el arranque del motor ya que una vez activado el contactor de *bypass*, el voltaje de alimentación del motor deja de pasar a través del arreglo de tiristores SCR.

Costo. La mayor desventaja que presenta el arrancador suave contra los demás tipos de arrancadores es su elevado costo, lo cual es relativo, ya que si se realiza un estudio del ahorro en la facturación eléctrica que el arrancador suave puede ofrecer, se podrá comprobar que el costo de la inversión es recuperable a mediano plazo, como se verá en el siguiente capítulo.

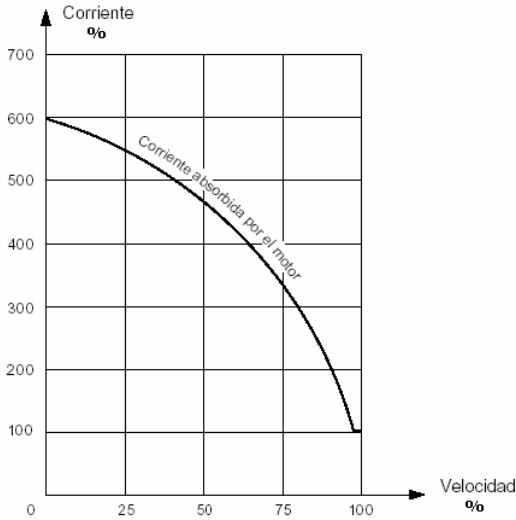
3.3 Comparación

En la figura 26 se presenta una comparación entre las corrientes de arranque que se producen con cada dispositivo, tomando en cuenta las características que presenta cada tipo de arranque y la forma que cada uno de ellos maneja la corriente de arranque en el motor. Según se observa, el mejor manejo de corriente de arranque lo realiza el arrancador suave, ya que éste se puede configurar con los requerimientos de par de arranque y de límite de corriente que requiera la aplicación.

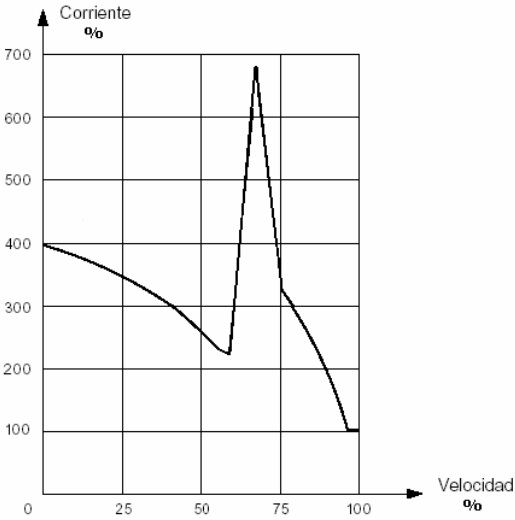
Así mismo, se observa que los arrancadores electromecánicos no dejan de crear un pico de corriente en algún momento durante su operación, con lo cual no se eliminan del todo los problemas que ocasiona un arranque directo.

Al comparar las ventajas y desventajas que poseen los arrancadores electromecánicos, se puede observar que el arrancador suave posee las mismas ventajas que los otros arrancadores y que además, revierte las desventajas de los arrancadores electromecánicos convirtiéndolas en ventajas propias.

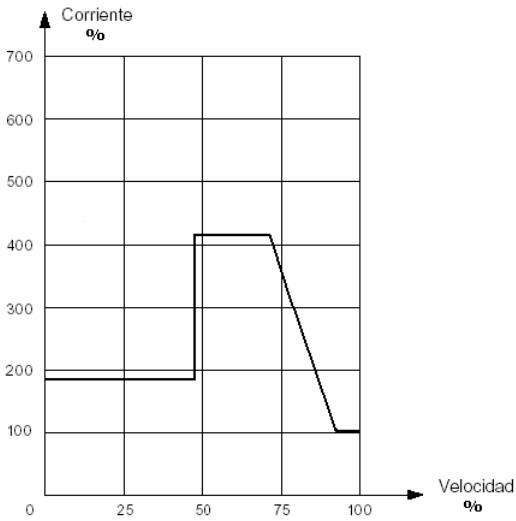
Figura 26. Comparación de corriente de arranque con distintos arrancadores



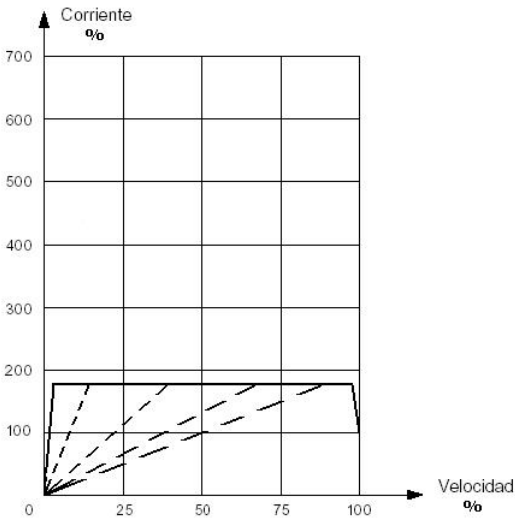
Arranque directo



Arranque estrella-delta



Arranque por autotransformador



Arranque suave

Fuente: Viv, Cohen. **Induction motors: Protection and starting**, Pág. 71.

3.4 Aplicaciones

La mejor opción para el arranque de motores en la actualidad es el arranque suave, ya que debido a la aceleración gradual que proporciona al motor utilizando dispositivos de estado sólido y la programación que se puede realizar, proveerá las mejores características de arranque según el tipo de aplicación que se trate. A continuación se presentan tres ejemplos de motores en la industria, a los cuales se les puede aplicar un arrancador suave.

3.4.1 Bombas

- a) Reduce los transitorios de presión, golpe de ariete y fatiga metálica en las tuberías, tanto en el arranque como en el paro.
- b) Disminuye la cavitación durante el arranque.
- c) Reduce la fatiga metálica en el eje de la bomba.
- d) Provee protección contra sobrecarga en el motor debido a atascos, protegiendo así la bomba contra cavitación y pérdida de lubricación de los cojinetes.
- e) La limitación de corriente también limitará el par del motor cuando ocurra una falla mecánica en la bomba.
- f) Genera una protección de sobrecorriente para proteger la bomba de cavitación a causa de pérdida de presión.
- g) Evita que la bomba trabaje en vacío.

3.4.2 Bandas transportadoras

- a) Reduce desajustes en la banda, rasgaduras en los empalmes y estiramientos de la banda.

- b) Con un arrancador con autotransformador, una banda transportadora que normalmente se arranca sin carga, podría no tener suficiente par inicial si se necesita arrancar cargada, produciendo un tiempo de arranque excesivo y perjudicial para el motor. Mientras que con un arrancador suave configurado con doble rampa puede arrancar la banda transportadora en condiciones de carga y sin carga.

- c) Se reducen los tiempos muertos de producción que ocasiona el mantenimiento o reemplazo de contactores con cualquier otro tipo de arrancador diferente al electrónico.

- d) El arranque en la banda debe ser gradual para evitar que el material transportado se dañe al ser golpeado por el arranque o incluso ser expulsado de la banda.

3.4.3 Compresores

- a) La variación de carga que tiene un compresor entre cada arranque, debido a diferentes factores como temperatura, condición de cojinetes, estado de la carga, etc., podría causar que el requerimiento de par inicial sea mayor que el 33 por ciento que ofrece un arranque estrella-delta. Por lo tanto, la corriente de arranque se mantendrá hasta que el temporizador del arrancador

haga la conmutación a la configuración delta, lo cual podría dañar el motor y los componentes de control. El arrancador suave siempre se ajustará para alcanzar el par necesario, acelerar la carga y mantener los niveles de corriente.

- b) Arrancar un compresor de líquidos con un arrancador electromecánico provocará transitorios del fluido mientras el motor se lleva a voltaje pleno, en cuyo proceso, las válvulas sufrirán fatiga y necesitarán mantenimiento. Un arrancador suave eliminará los picos de inicio y transición que genera un arrancador estrella-delta. Por lo tanto, existirá menor estrés mecánico al compresor, pistones y válvulas.

4. ANÁLISIS Y ESTUDIO EN LA DESTILADORA DE ALCOHOLES Y RONES SOCIEDAD ANÓNIMA

4.1 Antecedentes

La industria azucarera de Guatemala constituye un subsector económico con una participación significativa dentro del proceso productivo del país. Guatemala es el tercer exportador más importante de Latinoamérica, después de Brasil y Cuba, y genera el 23 por ciento del total de las divisas correspondientes a las exportaciones de los productos tradicionales, ocupando el segundo lugar después de la de café. La industria azucarera despegó en Guatemala a inicios de los años 60 y actualmente hay 17 ingenios en todo el país, concentrándose la mayoría en las tierras planas de la costa del pacífico en los departamentos de Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu y Santa Rosa.

El proceso productivo de la caña de azúcar inicia con la preparación del suelo para la siembra. Aproximadamente 6 meses después, cuando la caña alcanza su madurez, empieza el período de zafra, el cual consiste en el quemado de las áreas sembradas para facilitar el corte, alce y transporte a los ingenios azucareros para su procesamiento. Generalmente la zafra se inicia en noviembre y se extiende hasta abril.

En el procesamiento y transformación de la caña se derivan varios productos como el azúcar, que es el producto principal; la melaza, que sirve de materia prima para la elaboración de alcoholes y rones; y el bagazo, que es aprovechado por los ingenios como fuente de combustible para las calderas que suplen sus necesidades energéticas.

La Destiladora de Alcoholes y Ronas Sociedad Anónima (DARSA) se fundó el 28 de junio de 1974 en el kilómetro 90, ruta al pacífico en Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, y forma parte de las Industrias Licoreras de Guatemala. En este lugar es donde está centralizada la elaboración de alcohol del país y trabaja 24 horas al día para recibir melazas provenientes de los ingenios azucareros de la región para la elaboración de licores finos, populares y alcoholes industriales y medicinales.

DARSA produce de 20 mil a 60 mil litros diarios de alcohol, de lo cual un 10 por ciento se destina a la industria químico-farmacéutica nacional y extranjera, mientras que el 90 por ciento restante se usa para hacer licores. Un 30 por ciento de la producción de licores se vende en el mercado local, y el 70 por ciento se exporta. Europa es el principal destino, con un 60 por ciento de la producción total.

4.2 Proceso de elaboración de alcoholes

La planta de destilación comprende una compleja red de tuberías, tanques de almacenamiento, tanques de cocimiento y columnas de destilación ubicados en distintas áreas para elaborar los alcoholes y ronas.

El proceso se inicia con la llegada a la planta de pipas, con capacidad de 20 mil litros, provenientes de los ingenios azucareros. Estas pipas transportan la melaza hacia el área de materias primas después de haber pasado por la báscula para establecer la cantidad que transportan.

La melaza descargada en las piletas se bombea hacia los tanques de almacenamiento y posteriormente se traslada hacia el área de fermentación, en donde se filtra y luego se diluye con agua y se le agrega ácido sulfúrico para llegar al pH óptimo para la fermentación. Esto se realiza dentro de un tanque con agitador. De este proceso se obtiene el mosto, el cual se traslada a un tanque de calentamiento para su cocción a 80° C. Después se deja enfriar para agregarle los nutrientes y levadura, y posteriormente se traslada a los tanques de fermentación de acero inoxidable cerrados, por un tiempo de 40 horas.

Finalizado el proceso de fermentación se obtiene una solución llamada vino, la cual contiene entre el 6 y el 12 por ciento de alcohol etílico. Asimismo se obtiene como subproducto el gas carbónico CO₂, el cual se vende a otra empresa.

El siguiente proceso es la destilación, que consiste en calentar el mosto fermentado o vino hasta el punto de ebullición y condensar los vapores para separar el alcohol de los elementos no volátiles del mosto. Para este proceso se utilizan 3 columnas de destilación. El producto final que se obtiene es alcohol etílico al 95 por ciento y, como subproducto, vinaza, la cual se lleva a una planta de tratamiento para ser usada después en los sistemas de riego para la caña de azúcar.

El alcohol obtenido en este proceso se envía a las plantas añejadoras, las cuales en su mayoría están ubicadas en el altiplano del país, en donde el clima frío favorece el proceso de añejamiento.

4.3 Área de materias primas

Durante los 6 meses que dura la zafra, DARSA recibe toda la materia prima para trabajar el año completo, razón por la cual las pipas provenientes de los ingenios cargadas con melaza se descargan en el área de materias primas en 3 piletas con capacidad total de 50 mil litros. El contenido de las piletas se traslada a los tanques de almacenamiento con las bombas de melaza identificadas por BMXX donde BM significa bomba de melaza y XX es el número correlativo de cada una de ellas. Los 4 motores eléctricos trifásicos que se utilizan para el efecto tienen instalado un arrancador suave, cuyas principales características se describen en la tabla III.

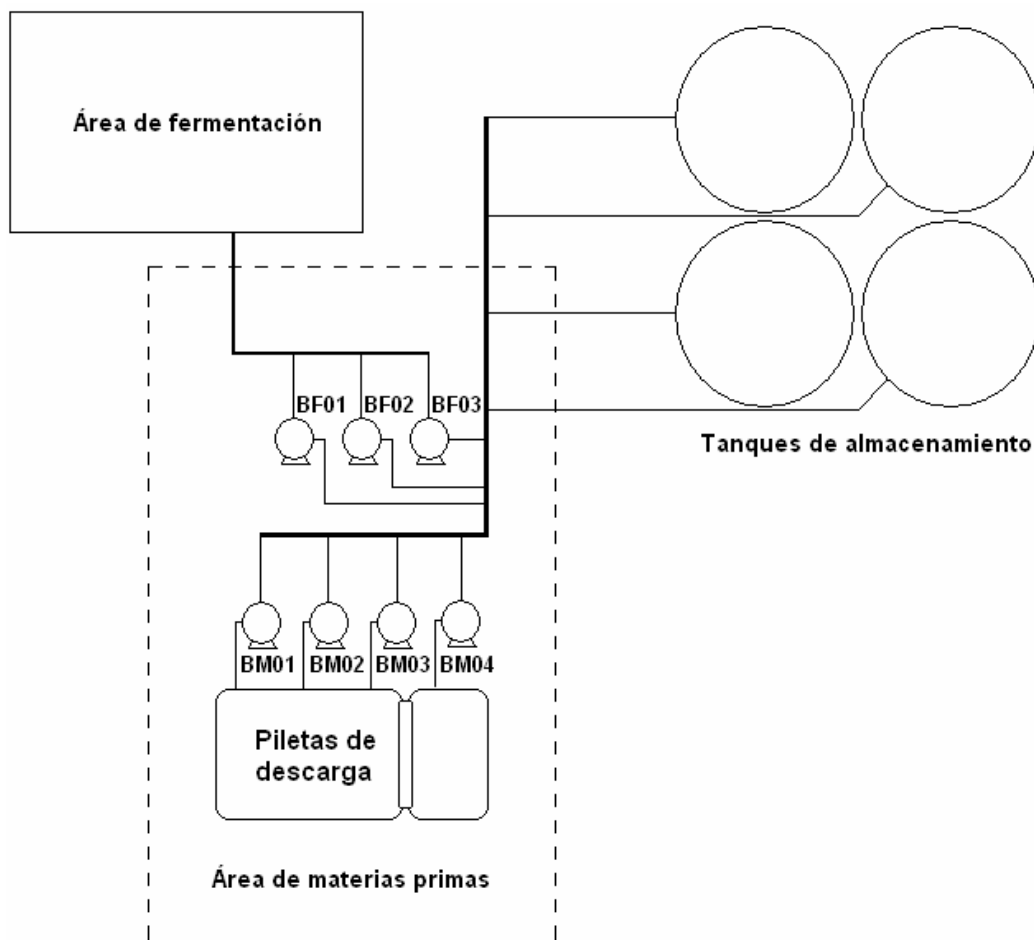
Tabla III. Características de los motores instalados en las bombas de melaza del área de materias primas.

No.	Código motor	Potencia (hp)	Voltaje (V)	Corriente nominal (A)	RPM	Corriente bajo carga (A) promedio	Corriente arranque (A) promedio
1	BM01	75	460	85	1755	81.7	120.9
2	BM02	40	460	43	1785	40.5	69.5
3	BM03	50	460	66	1180	63.4	89.8
4	BM04	30	460	36	1700	34.1	51.5

Los motores de las bombas de melaza del área de materias primas tienen instalados arrancadores suaves marca ABB serie PSS. El control de mando de arranque se encuentra instalado en cada pileta y el arrancador está en el cuarto de controles dentro de la planta.

Para iniciar el proceso de fermentación, se utilizan las bombas de fermentación identificadas como BFXX donde BF significa bomba de fermentación y XX es el número correlativo de cada una de ellas. Su función es trasladar la melaza desde los tanques de almacenamiento hacia el área de fermentación para proceder a su filtrado.

Figura 27. Esquema del área de materias primas de DARSA



Actualmente los dos motores de las bombas de fermentación BF01 y BF02, cuyas características se describen en la tabla IV, están conectados a la línea de voltaje con arrancadores electromagnéticos y presentan grandes corrientes de arranque.

La empresa planea instalar un tercer motor (BF03) de mayor potencia que los actuales para mejorar el rendimiento de bombeo hacia el área de fermentación debido a la expansión en dicha área. También desea reducir las corrientes de arranque de las bombas de fermentación para dejarlos configurados de manera similar a las bombas de melaza, ya que son de características similares.

Tabla IV. Características de los motores instalados en las bombas de fermentación del área de materias primas.

No.	Código motor	Potencia (hp)	Voltaje (V)	Corriente nominal (A)	RPM	Corriente bajo carga (A) promedio	Corriente arranque (A) promedio
1	BF01	40	460	43	1785	39.7	240
2	BF02	40	460	43	1785	40.4	228
3	BF03	75	460	85	1755	---	---

4.4 Configuración actual

Actualmente el área de materias primas de la empresa se conecta a un banco de transformadores de 225 kVA y cuenta con un medidor de energía con demandómetro dedicado. La carga contratada para el área indicada es de 90 kilovatios. Los motores de las bombas, tanto las de melaza como las de fermentación, son los mayores contribuyentes a la carga.

Debido al tipo de arranque que poseen las bombas BF01 y BF02, que es un arrancador electromagnético NEMA 3, la corriente de arranque de 230 A promedio es demasiado alta ya que constituye un 535 por ciento de la corriente nominal de tales motores. Esto eleva el cargo por demanda y como son bombas que se arrancan varias veces al día es necesario proteger el devanado de los motores disminuyendo la corriente inicial.

Además, se planea instalar una bomba con un motor de 75 hp (BF03) que elevaría aún más el cargo por demanda, haciendo inadecuado el arranque directo con arrancador electromagnético.

4.5 Cálculos

Actualmente el contador demandómetro del área de materias primas registra una demanda máxima de 125 kilovatios, lo cual genera un cargo por exceso de demanda, ya que sobrepasa el valor de potencia contratada, el cual es de 90 kilovatios. Por esta razón se requiere disminuir la corriente de arranque de los motores de dicha área para así reducir el valor de demanda máxima, así como también proteger los devanados de tales motores. Por esta razón se realizará un estudio de factibilidad para instalar arrancadores tanto en los dos motores que actualmente funcionan en las bombas de fermentación BF01 y BF02 como en el tercer motor que se instalará en la nueva bomba de fermentación BF03.

Con la instalación de los arrancadores se reducirá la demanda que los motores de las bombas de fermentación generan durante el arranque para evitar que se produzca un exceso de demanda. La selección del arrancador dependerá de sus características y de que se adapte a las necesidades de arranque de las bombas y a los límites de corriente de arranque para disminuir la demanda máxima de la instalación.

Se pudo comprobar, utilizando un medidor de calidad de energía, que la demanda máxima del área de materias primas a plena carga es de 83 kilovatios distribuidos de la siguiente manera: la demanda que se presenta cuando los motores de las bombas de melaza están funcionando es de 62 kilovatios, lo cual deja un margen de 28 kilovatios para el arranque de las bombas de

fermentación. Sin embargo, se observó que cuando se arrancan estos motores, la demanda se eleva a 125 kilovatios, lo cual indica que entre el arranque y la marcha de los motores de las bombas de fermentación se están consumiendo aproximadamente 63 kilovatios, 42 kilovatios para el arranque y 21 kilovatios a plena marcha.

El arrancador que se instale en los motores de las bombas de fermentación no debe permitir que la demanda registrada en el arranque sobrepase los 28 kilovatios, ya que de otra manera se excedería la potencia contratada y no se resolvería el problema. Cabe mencionar que la máquina que controla el caudal de melaza para el filtrado en el proceso de fermentación cuenta con una programación para evitar el arranque simultáneo de los motores de las bombas de fermentación. De esta manera se previene que la corriente de la red se duplique durante el arranque de dichos motores.

Tabla V. Datos de los motores de las bombas de fermentación

Parámetro	BF01	BF02	BF03*
Potencia (hp)	40	40	75
Voltaje bajo carga por fase (V)	232	233	N/D
Corriente de placa (A)	43	43	85
Corriente bajo carga promedio (A)	39.7	40.4	N/D
Corriente de arranque a pleno voltaje (A)	263	250	N/D
Corriente de arranque deseada (A)	68 ± 3	68 ± 3	148 ± 4
Voltaje en la red durante el arranque (V)	208.2	209.7	N/D
Voltaje deseado en la red durante el arranque (V)	235 ± 5	235 ± 5	235 ± 5
Demanda registrada en el arranque (kW)	54.8	52.4	N/D
Demanda registrada deseada (kW)	16 ± 1	16 ± 1	35 ± 2

* Debido a que esta bomba aún no está instalada, hay algunos datos que no se presentan porque no están disponibles (N/D).

El estudio se realizó con el motor BM02 de las bombas de melaza, ya que cuando se efectuó ya había terminado la zafra y esa parte del área de materias primas estaba en período de mantenimiento y los motores de las bombas de melaza están disponibles para el estudio. No fue posible realizarlo con los motores de las bombas de fermentación, porque éstas trabajan continuamente en el proceso de producción.

Para la medición se realizó la transferencia de melaza entre dos tanques de almacenamiento diferentes, con lo cual se buscaba proporcionar una longitud de carga similar con la que trabajarían las tres bombas en el área de fermentación. Los costos para una potencia contratada de 90 kilovatios son los siguientes:

Generación y transporte:

Cargos por potencia máxima	CPMg = 39.3665 Q/kW
----------------------------	---------------------

Distribución:

Cargos por potencia máxima	CPMd = 1.9352 Q/kW
----------------------------	--------------------

Cargos por potencia contratada	CPCd = 119.0353 Q/kW
--------------------------------	----------------------

La base del estudio será la proyección a un año de los costos del arrancador basados en el costo mensual promedio de la demanda y el costo del arrancador instalado. Luego, se presentarán datos proyectados a 5 años para tener una mejor visualización del beneficio que presenta cada tipo de arrancador. Para el efecto se utilizarán las ecuaciones 6, 7, 8, 9, 10 y 11.

Ecuación 6:

$$CMPU = (DRa * CPMg) + (DRa * CPMd)$$

Donde:

- CMPU : Costo mensual por potencia utilizada (Q.)
- DRa : Demanda registrada en el arranque (kW)
- CPMg : Costo de potencia máxima en generación (Q/kW)
- CPMd : Costo de potencia máxima en distribución (Q/kW)

La ecuación 6 sirve para calcular el costo mensual por potencia utilizada, para lo cual emplea la demanda registrada en el arranque de los motores. Dicha ecuación se compone de la suma de dos términos, el primero establece el cargo por potencia máxima que corresponde al generador de la energía, y el segundo es el cargo por potencia máxima del distribuidor de la misma.

Ecuación 7:

$$P = (DRa - L) * 2 * (CPCg)$$

Donde:

- P : Penalización (Q.)
- DRa : Demanda registrada en el arranque (kW)
- L : Límite para evitar exceso de demanda, en este caso su valor es de 28 kW
- CPCg : Costo de potencia contratada en generación (Q/kW)

La ecuación 7 únicamente se utilizará cuando la demanda registrada en el arranque sea superior a 28 kilovatios, ya que eso indica que existe exceso de demanda y se realizará el cálculo del costo de penalización.

Si la demanda registrada en el arranque no excede los 28 kilovatios, entonces el valor de penalización será cero.

Ecuación 8:

$$TFM = CMPU + P$$

Donde:

- TFM : Total facturado mensual (Q.)
CMPU: Costo mensual por potencia utilizada (Q.)
P : Penalización (Q.)

La ecuación 8 muestra el cargo total por potencia utilizada del arranque de un motor durante un mes de servicio.

Ecuación 9:

$$CA_{\text{Anual}} = 12 * (TFM) + CA$$

Donde:

- CA_{Anual} : Costo anual por potencia utilizada el primer año (Q.)
TFM : Total facturado mensual (Q.)
CA : Costo del arrancador (Q.)

La ecuación 9 establece la amortización mensual del arrancador en un año tomando en cuenta los cargos por potencia máxima del motor.

Ecuación 10:

$$CMP = C_{\text{Anual}} / 12$$

Donde:

- CMP : Costo mensual promedio para el primer año (Q.)
- CAnual : Costo anual por potencia utilizada el primer año (Q.)

La ecuación 10 sirve para determinar el costo mensual promedio tanto de cargos por potencia máxima como del costo del arrancador amortizado en un año.

Ecuación 11:

$$Costo5años = C_{\text{Anual}} + (TFM * 48)$$

Donde:

- Costo5años : Costo en 5 años (Q.)
- CAnual : Costo anual por potencia utilizada el primer año (Q.)
- TFM : Total facturado mensual (Q.)

Finalmente, la ecuación 11 indica el costo proyectado a 5 años con el arrancador instalado.

El estudio se realizó con cuatro dispositivos arrancadores diferentes que son el arrancador directo, el arrancador estrella-delta, el arrancador por autotransformador y el arrancador suave. La medición de parámetros se hizo utilizando el siguiente equipo:

- a) Dos multímetros digitales marca Fluke modelo 337 tipo gancho para medición de voltaje y corriente alterna con medición y registro de valores máximos, valores mínimos y valores de irrupción.
- b) Un medidor de calidad de energía portátil marca General Electric modelo PQM-T20-C versión 100.000, con una precisión de $\pm 0.2\%$ a plena escala, capaz de medir corriente, voltaje y demanda, equipado con puntas tipo gancho para medición de corriente y puntas para medición de voltaje. El medidor es capaz de registrar valores máximos, valores mínimos y valores de irrupción.

4.5.1 Cálculos con arrancador directo

La configuración actual tiene un arranque directo NEMA 3, el cual presenta los datos que se muestran en la tabla VI.

Tabla VI. Mediciones con arrancador electromagnético en el motor BF01

Parámetro	BF01
Potencia (hp)	40
Voltaje bajo carga por fase (V)	232
Corriente de placa (A)	43
Corriente bajo carga promedio (A)	39.7
Corriente de arranque a pleno voltaje (A)	263
Corriente de arranque deseada (A)	68 ± 3
Voltaje en la red durante el arranque (V)	208.2
Voltaje deseado en la red durante el arranque (V)	235 ± 5
Demanda registrada en el arranque (kW)	54.8
Demanda registrada deseada (kW)	16 ± 1

Utilizando las siguientes ecuaciones se puede obtener el costo mensual promedio cuando el motor utiliza un arrancador electromagnético.

Ecuación 6:

$$CMPU = (DRa * CPMg) + (DRa * CPMd)$$

$$CMPU = (54.8kW * 39.3665Q / kW) + (54.8kW * 1.9352Q / kW)$$

$$CMPU = Q.2,263.33$$

Debido a que el valor registrado de demanda en el arranque supera los 28 kilovatios se utiliza la ecuación 7.

Ecuación 7:

$$P = (DRa - L) * 2 * (CPCg)$$

$$P = (54.8kW - 28kW) * 2 * (119.0353Q / kW)$$

$$P = Q.6,380.29$$

El total facturado mensual se calcula sumando el costo mensual por potencia más los cargos por penalización.

Ecuación 8:

$$TFM = CMPU + P$$

$$TFM = Q.2,263.33 + Q.6,380.29$$

$$TFM = Q.8,643.63$$

El costo anual por potencia utilizada durante el primer año se calcula a continuación con la ecuación 9.

Ecuación 9:

$$C_{Anual} = 12 * (TFM) + CA$$

$$C_{Anual} = 12 * (Q.8,643.63) + (Q.0.00)$$

$$C_{Anual} = Q.103,723.56$$

Debido a que el arrancador electromagnético ya se encuentra instalado, el costo del arrancador se toma como Q.0.00. De esta forma, el costo mensual promedio CMP es el mismo que el total facturado mensual (TFM).

$$CMP = TFM = Q.8,643.63$$

El costo a 5 años se puede calcular utilizando la ecuación 11:

Ecuación 11:

$$Costo5años = C_{Anual} + (TFM * 48)$$

$$Costo5años = (Q.103,723.56) + (Q.8,643.63 * 48)$$

$$Costo5años = Q.518,617.80$$

Tabla VII. Resumen de costos de un arrancador directo

	Costo mensual (CMP)	Costo anual para el primer año (CAnual)	Costo total en 5 años (Costo5años)
Costos con arrancador directo	Q. 8,643.63	Q103,723.50	Q. 518,617.80

4.5.2 Cálculos con arrancador estrella-delta

El arrancador estrella-delta es uno de los dispositivos más económicos en el mercado y tiene la ventaja de que su instalación es relativamente sencilla.

Sin embargo, la capacidad de reducción de corriente de arranque es baja debido al pico que se genera en la transición de estrella a delta.

Se realizó la instalación de un arrancador estrella-delta de transición abierta en el motor BM02 y se obtuvieron las mediciones que se muestran a continuación.

Tabla VIII. Mediciones con arrancador estrella-delta en el motor BM02

Parámetro	BM02
Potencia (hp)	40
Voltaje bajo carga (V)	234
Corriente de placa (A)	43
Corriente bajo carga (A)	40.1
Corriente de arranque a pleno voltaje (A)	261
Corriente de arranque estrella-delta (A)	190.1
Corriente de arranque deseada	68 ± 3
Voltaje en la red durante el arranque a pleno voltaje (V)	210.2
Voltaje en la red con arranque estrella-delta (V)	224
Voltaje deseado en la red durante el arranque (V)	235 ± 5
Demanda registrada arranque directo (kW)	54.9
Demanda registrada estrella-delta (kW)	42.5
Demanda registrada deseada (kW)	16 ± 1

Según se puede observar en la tabla VIII, con el uso del arrancador estrella-delta se logró mejorar las condiciones de arranque del motor ya que se logró estabilizar el voltaje de arranque evitando disminución excesiva en el mismo y reducción de la corriente.

Sin embargo, tal reducción es insuficiente para justificar su implementación, ya que la corriente de arranque se redujo 70.8 amperios, de 261 a 190.2, lo que significa un 27.1 por ciento de reducción del amperaje, pero el mismo sigue estando por encima de los 68 amperios máximos que debería tener este motor en el arranque. La medición de demanda con este arrancador únicamente disminuyó 12.4 kilovatios, situando la lectura en 42.5 kilovatios y no se logra llegar a los 16 kilovatios que se desean de demanda en el arranque de este motor.

Utilizando las ecuaciones anteriormente mencionadas, se puede obtener el costo mensual promedio por potencia utilizada al utilizar este tipo de arrancador.

Ecuación 6:

$$\begin{aligned}
 CMPU &= (DRa * CPMg) + (DRa * CPMd) \\
 CMPU &= (42.5kW * 39.3665Q / kW) + (42.5kW * 1.9352Q / kW) \\
 CMPU &= Q.1,755.32
 \end{aligned}$$

Ahora se utiliza la ecuación 7, ya que el valor registrado de demanda en el arranque supera los 28 kilovatios.

Ecuación 7:

$$\begin{aligned}
 P &= (DRa - 28) * 2 * (CPCg) \\
 P &= (42.5kW - 28kW) * 2 * (119.0353Q / kW) \\
 P &= Q.3,452.02
 \end{aligned}$$

El total facturado mensual se calcula utilizando la ecuación 8.

Ecuación 8:

$$\begin{aligned}TFM &= CMPI + P \\TFM &= Q.1,755.32 + Q.3,452.02 \\TFM &= Q.5,207.35\end{aligned}$$

Una vez calculado el total del costo por potencia máxima, se agrega el costo del arrancador el cual tiene un precio en el mercado de Q.1,500.00. De esta forma se obtiene el costo anual para el primer año.

Ecuación 9:

$$\begin{aligned}C_{Anual} &= 12 * (TFM) + CA \\C_{Anual} &= 12 * (Q.5,207.35) + (Q.1,500.00) \\C_{Anual} &= Q.63,988.15\end{aligned}$$

Finalmente, para establecer el costo mensual incluyendo el costo del arrancador se divide el costo anual entre 12 meses.

Ecuación 10:

$$\begin{aligned}CMP &= C_{Anual} / 12 \\CMP &= Q.63,988.15 / 12 \\CMP &= Q.5,332.35\end{aligned}$$

Como se puede apreciar con la ecuación 8, el total facturado mensual para el motor es de Q.5,207.35. Utilizando la ecuación 11 se puede obtener el costo en 5 años así:

Ecuación 11:

$$\begin{aligned} \text{Costo5años} &= \text{CAnual} + (\text{TFM} * 48) \\ \text{Costo5años} &= (\text{Q.}63,988.15) + (\text{Q.}5,207.35 * 48) \\ \text{Costo5años} &= \text{Q.}313,940.95 \end{aligned}$$

Los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores se presentan en la tabla siguiente.

Tabla IX. Resumen de costos de un arrancador estrella-delta

	Costo mensual (CMP)	Costo anual para el primer año (CAnual)	Costo total en 5 años (Costo5años)
Costos con arrancador directo	Q. 8,643.63	Q103,723.50	Q. 518,617.80
Costos con arrancador estrella-delta	Q. 5,332.35	Q63,988.15	Q. 313,940.95

4.5.3 Cálculos con arrancador autotransformador

Como se indicó, una de las ventajas del arranque con autotransformador es que posee un cambiador de derivaciones para ajustar el voltaje en las terminales del motor.

Se realizó la instalación de un autotransformador de arranque marca Hammond Power modelo 3006 con cambiador de derivaciones en 50, 65 y 85 por ciento del voltaje nominal en el motor BM02. Las mediciones con el autotransformador de arranque se realizaron en las 3 posiciones del tap central del mismo.

Cabe indicar que los valores de corriente de arranque no son los esperados dada la relación de transformación escogida, ya que durante la transición a pleno voltaje se genera un transitorio de corriente el cual aumenta la corriente total consumida por el motor.

Tabla X. Mediciones con arrancador autotransformador en el motor BM02

Parámetro	BM02			
Potencia (hp)	40			
Voltaje bajo carga (V)	234			
Corriente de placa (A)	43			
Corriente bajo carga (A)	40.1			
Corriente de arranque a pleno voltaje (A)	261			
Corriente de arranque autotransformador (A)	50%	65%	85%	
	93	135	170	
Corriente de arranque deseada	68 ± 3			
Voltaje en la red durante el arranque a pleno voltaje (V)	210.2			
Voltaje en la red con autotransformador (V)	50%	65%	85%	
	215	219	223	
Voltaje deseado en la red durante el arranque (V)	235 ± 5			
Demanda registrada arranque directo (kW)	54.9			
Demanda registrada autotransformador (kW)	50%	65%	85%	
	20	29.5	38	
Demanda registrada deseada (kW)	16 ± 1			

La tabla X muestra los valores obtenidos de las mediciones en el motor BM02 para las distintas posiciones del tap central del autotransformador, y se puede apreciar que dependiendo de la relación de transformación escogida, se obtuvieron distintos valores de corriente de arranque.

Así mismo, es posible observar que se obtiene una mejora sensible en cualquiera de las posiciones del tap central en relación con el arranque estrella-delta, pero siguen siendo valores muy altos, aún con el 50 por ciento del voltaje aplicado, el cual proporcionó la menor corriente de arranque a expensas del par de arranque de la bomba. Se pudo observar un mayor tiempo de arranque en relación con los otros voltajes del autotransformador, lo cual no es recomendable debido al calentamiento que sufre el devanado del motor.

Utilizando las ecuaciones de la 6 a la 11, se puede obtener el costo mensual promedio al utilizar un arrancador con autotransformador:

Ecuación 6:

$$\begin{aligned}
 CMPU &= (DRa * CPMg) + (DRa * CPMd) \\
 CMPU &= (29.5kW * 39.3665Q / kW) + (29.5kW * 1.9352Q / kW) \\
 CMPU &= Q.1,218.40
 \end{aligned}$$

Se utiliza la ecuación 7, ya que el valor registrado de demanda en el arranque supera los 28 kilovatios.

Ecuación 7:

$$\begin{aligned}
 P &= (DRa - L) * 2 * (CPCg) \\
 P &= (29.5kW - 28kW) * 2 * (119.0353Q / kW) \\
 P &= Q.357.11
 \end{aligned}$$

El total se calcula sumando el costo mensual por potencia más los cargos por penalización.

Ecuación 8:

$$\begin{aligned}TFM &= CMPU + P \\TFM &= Q.1,218.40 + Q.357.11 \\TFM &= Q.1,575.51\end{aligned}$$

Una vez calculado el total del costo por potencia máxima, se agrega el costo del arrancador por autotransformador que es de Q.5,000.00. De esta forma se obtiene el costo sobre una base anual.

Ecuación 9:

$$\begin{aligned}CA_{\text{Anual}} &= 12 * (TFM) + CA \\CA_{\text{Anual}} &= 12 * (Q.1,571.51) + (Q.5,000.00) \\CA_{\text{Anual}} &= Q.23,906.07\end{aligned}$$

Con la ecuación 10 se establece el costo mensual durante el primer año.

Ecuación 10:

$$\begin{aligned}CMP &= CA_{\text{Anual}} / 12 \\CMP &= Q.23,906.07 / 12 \\CMP &= Q.1,992.17\end{aligned}$$

Como se puede apreciar con la ecuación 8, el total facturado mensual para el motor es de Q.5,207.35. A continuación se obtiene el costo en 5 años.

Ecuación 11:

$$\begin{aligned}Costo_{\text{5 años}} &= CA_{\text{Anual}} + (TFM * 48) \\Costo_{\text{5 años}} &= (Q.23,906.07) + (Q.1,992.17 * 48) \\Costo_{\text{5 años}} &= Q.119,530.23\end{aligned}$$

Tabla XI. Resumen de costos de un arrancador por autotransformador

	Costo mensual (CMP)	Costo anual para el primer año (CAñual)	Costo total en 5 años (Costo5años)
Costos con arrancador directo	Q. 8,643.63	Q103,723.50	Q. 518,617.80
Costos con arrancador por autotransformador	Q. 1,992.17	Q23,906.07	Q. 119,530.23

Según se puede observar en la tabla XI hay una mejora en las condiciones de arranque del autotransformador respecto al arranque estrella-delta, lo cual se observa en los costos al utilizar dicho arrancador.

4.5.4 Cálculos con arrancador suave

Hasta ahora se realizó la medición de corriente de arranque y valores de demanda máxima generada por un motor con arrancadores electromecánicos, los cuales han mejorado los parámetros medidos respecto a el arranque directo pero sin llegar a los valores deseados.

Se realizó una prueba en el motor BM02 el cual originalmente posee instalado un arrancador suave marca ABB modelo PSS-60-500-F configurado en modo de arranque de corriente limitada al 26 por ciento. Dicho motor tiene las características del arrancador suave que se desea instalar en los motores BF01 y BF02; se midieron los parámetros durante el arranque.

Según se observa en la tabla XII, el arrancador suave presenta las mejores condiciones de arranque en el motor, ya que se configuró en el modo de límite de corriente al 26 por ciento de la corriente de arranque a pleno voltaje, es decir, la corriente de arranque promedio a pleno voltaje es de 261 A, con la configuración de límite de corriente al 26 por ciento la corriente que el motor absorbe de la red está limitada a aproximadamente 69 A, y se obtuvo un arranque satisfactorio con un nivel bajo de corriente de arranque.

Tabla XII. Mediciones con arrancador suave en el motor BM02

Parámetro	BM02
Potencia (hp)	40
Voltaje bajo carga (V)	234
Corriente de placa (A)	43
Corriente bajo carga (A)	40.1
Corriente de arranque a pleno voltaje (A)	261
Corriente de arranque suave (A)	69.5
Corriente de arranque deseada	68 ± 3
Voltaje en la red durante el arranque a pleno voltaje (V)	210.2
Voltaje en la red con arranque suave (V)	236
Voltaje deseado en la red durante el arranque (V)	235 ± 5
Demanda registrada arranque directo (kW)	54.9
Demanda registrada suave (kW)	16.4
Demanda registrada deseada (kW)	16 ± 1

Utilizando las ecuaciones anteriormente mencionadas, se puede obtener el costo mensual promedio al utilizar este tipo de arrancador.

Ecuación 6:

$$\begin{aligned}CMPU &= (DRa * CPMg) + (DRa * CPMd) \\CMPU &= (16.4kW * 39.3665Q / kW) + (16.4kW * 1.9352Q / kW) \\CMPU &= Q.677.35\end{aligned}$$

La ecuación 7 no es necesaria con el arrancador suave, ya que el valor registrado de demanda en el arranque es menor a los 28 kilovatios.

Ecuación 8:

$$\begin{aligned}TFM &= CMPU + P \\TFM &= Q.1,755.32 + Q.0.00 \\TFM &= Q.677.35\end{aligned}$$

Una vez calculado el total del costo por potencia máxima, se agrega el costo del arrancador de Q.15,000.00 para obtener un costo sobre una base anual.

Ecuación 9:

$$\begin{aligned}CA_{anual} &= 12 * (TFM) + CA \\CA_{anual} &= 12 * (Q.677.35) + (Q.15,000.00) \\CA_{anual} &= Q.23,128.17\end{aligned}$$

Para establecer el costo mensual durante el primer año incluyendo el costo del arrancador se divide el costo anual entre 12 meses.

Ecuación 10:

$$\begin{aligned}CMP &= CA_{anual} / 12 \\CMP &= Q.23,128.17 / 12 \\CMP &= Q.1,927.35\end{aligned}$$

A continuación se obtiene el costo en 5 años

Ecuación 11:

$$\begin{aligned} \text{Costo5años} &= C_{\text{Anual}} + (TFM * 48) \\ \text{Costo5años} &= (Q.23,128.17) + (Q.677.35 * 48) \\ \text{Costo5años} &= Q.55,640.97 \end{aligned}$$

Tabla XIII. Resumen de costos de un arrancador suave

	Costo mensual (CMP)	Costo anual para el primer año (CAñual)	Costo total en 5 años (Costo5años)
Costos con arrancador directo	Q. 8,643.63	Q103,723.50	Q. 518,617.80
Costos con arrancador suave	Q. 1,927.35	Q23,128.17	Q. 55,640.97

En la tabla XIII se presentan los resultados de los cálculos efectuados y se observa que los costos bajan sensiblemente en relación con los costos de operar el motor sin arrancador. Así mismo, también se brindará protección a los motores contra la degradación del aislamiento de los devanados, ya que se reduce la corriente de arranque.

4.6 Comparación de resultados

El estudio se realizó con el motor BM02 del área de materias primas, ya que no fue posible hacerlo con el BM01 (equivalente al que se instalará en el área de fermentación que también será de 75 hp).

Debido a su alta corriente de arranque, sin el arrancador suave (alrededor de 500 A), y dado que se observó la ineficiencia del arrancador estrella-delta y el autotransformador con el motor BM02, hubiera significado un aumento en el registro de demanda máxima que sería inaceptable debido a los costos que llevaría realizar el estudio con el motor BM01.

Tabla XIV. Comparación de parámetros con los distintos arrancadores en el motor BM02.

Parámetro	BM02						
Potencia (hp)	40						
Corriente de placa (A)	43						
Corriente bajo carga (A)	40.1						
Corriente de arranque (A)	Directo	Y-D	Autotransformador			Suave	Deseado
	263	190.1	50%	65%	80%	69.5	68 ± 3
			93	135	170		
Voltaje de arranque (V)	Directo	Y-D	Autotransformador			Suave	Deseado
	208.2	224	50%	65%	80%	236	235 ± 5
			215	219	223		
Demanda registrada (kW)	Directo	Y-D	Autotransformador			Suave	Deseado
	54.8	42.5	50%	65%	80%	16.4	16 ± 1
			20	29.5	38		
Costo mensual promedio durante el primer año (Q.)	Directo	Y-D	Autotransformador		Suave		
	8,643.63	5,332.35	1,992.17		1,927.35		
Costo anual para el primer año (Q.)	Directo	Y-D	Autotransformador		Suave		
	103,723.50	63,988.15	23,906.07		23,128.17		
Costo total en 5 años (Q.)	Directo	Y-D	Autotransformador		Suave		
	518,617.80	313,940.95	119,530.23		55,640.97		

La tabla XIV muestra la comparación de los diferentes parámetros obtenidos con la instalación de los tres diferentes arrancadores para el motor de la bomba BM02. Hay que recordar que la columna de valores *deseados* se basa en los valores que presentan los motores de similares características a las de las bombas de melaza, los cuales son la base de comparación para realizar el estudio.

Se puede observar que el arrancador suave limita la corriente de arranque del motor y no permite que el voltaje de la red caiga durante el período de arranque, con lo cual se logra un valor reducido de demanda registrada en la instalación por el arranque de los motores, lo cual lo hace la mejor opción para instalarlo en los motores de las bombas de fermentación.

Por otra parte, el arrancador con autotransformador reduce la corriente de arranque así como la demanda registrada por el arranque de los motores. Sin embargo, los valores son altos y no constituye la opción óptima para reducir al máximo los costos por demanda máxima. Finalmente, se puede observar que el arrancador estrella-delta es la opción menos aconsejable debido a que los valores de corriente y demanda registrada, si bien se reducen respecto al arranque directo, son muy altos, lo cual generaría altos costos de facturación eléctrica.

Durante la realización del estudio fue posible observar, con ayuda del medidor de calidad de energía, la forma en que las corrientes de arranque afectan el valor máximo de demanda, así como las posibles soluciones por medio de los tres tipos de arrancadores. De esta manera, se obtuvo una mejor visualización de la forma en que trabaja cada uno de los arrancadores y fue posible la elección de la mejor opción.

CONCLUSIONES

1. Los daños que puede provocar la falta de control de las corrientes de arranque de los motores eléctricos son muy variados, y van desde daño mecánico del motor y las cargas mecánicas acopladas al mismo, hasta problemas en la facturación eléctrica. Todo ello se puede solucionar con la instalación de un arrancador adecuado a la aplicación.
2. Los tipos de arrancador más comunes en la actualidad son el arrancador estrella-delta, el arrancador con autotransformador y el arrancador suave. Cada uno de ellos tiene sus propias características. La elección del más adecuado dependerá de la aplicación que se trate.
3. Debido a que el arrancador suave provee un mejor control del voltaje y corriente de arranque que los arrancadores electromecánicos, el arranque electrónico se ha vuelto popular para el arranque de motores en la industria. El alto precio de este tipo de equipo inicialmente los relegó a las aplicaciones en las cuales un arranque controlado era crítico. Sin embargo, el desarrollo en el campo de la electrónica de potencia y la baja en los precios de los componentes de estado sólido han propiciado el cambio de los arrancadores de electromecánicos hacia los electrónicos en una gran variedad de aplicaciones.

4. Un arrancador suave se adapta prácticamente a cualquier aplicación y su configuración está íntimamente ligada con el tipo de carga mecánica que tendrá el motor y sus niveles de desempeño, a fin de lograr el arranque óptimo para la aplicación de que se trate.

5. La versatilidad que tiene un arrancador suave para poderlo configurar en distintos modos de operación permite su instalación en prácticamente cualquier aplicación, y de esta forma es factible mantener los parámetros de arranque en valores adecuados.

RECOMENDACIONES

1. En una instalación que posea motores de potencia inferior a los 7 hp es conveniente arrancarlos con un arrancador magnético a pleno voltaje, ya que de esta forma se obtiene el mejor par de arranque y, debido a la mayor impedancia de sus devanados, se reduce la amplitud de la corriente de arranque. De ésta manera no se afecta la medición de demanda de la instalación.
2. Para motores de potencia superior a los 7 hp, es aconsejable la instalación de un dispositivo arrancador, cuya elección se debe basar en las condiciones de carga mecánica, límite de corriente y demanda durante el arranque.
3. Para los tres motores de las bombas de fermentación del área de materias primas de DARSA se sugiere la instalación de arrancadores suaves, configurados en el modo de límite de corriente al 26%, ya que este tipo de arrancador ofrece el mayor beneficio económico en la reducción de la factura eléctrica, debido a que se logra un arranque satisfactorio de los motores con los valores de corriente y demanda en el arranque controlados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Al-Jufout, Saleh. **Computational modeling of the squirrel-cage induction motor starting process**. Jordania: Al-Balqa' Applied University. 2002.
2. Chapman, Stephen. **Máquinas eléctricas**. 3a ed. Colombia: McGraw- Hill, 2000.
3. Cohen, Viv. **Induction motors. Protection and starting**. Suráfrica: Circuit Breakers Industry. 2000.
4. **Combination starter basics. A guide to understand and selling combination starters**. Estados Unidos de América: s.e. 1990.
5. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Normas técnicas del servicio de distribución**. Guatemala: s.e. 1999.
6. **Comprehensive guide to understanding motor fundamentals**. Estados Unidos de América: Rockwell International. 1998.
7. Edison Electric Institute. **Handbook of electricity metering**. 8a ed. Estados Unidos de América: Edison Electric Institute. 1998.
8. **Electronic starters and variable speed drives (Cahiers techniques)**. Estados Unidos de América: Schneider Electric. 2002.
9. Empresa Eléctrica de Guatemala. **Normas para acometidas de servicio eléctrico**. 12a ed. Guatemala: s.e. 1998.
10. **Energy management**. Estados Unidos de América: General Electric Company. 2003.
11. Fink, Donald y Beaty, Wayne. **Manual de ingeniería eléctrica**. 13a ed. México: Mc Graw-Hill, 2001.
12. **GE kv2 Multifunction meter. Features and applications**. Estados Unidos de América: General Electric Company. 2000.
13. Giménez, Cristóbal. **Dispositivos e instalaciones eléctricas**. Argentina: Universidad de La Plata. 2003.

14. Gourishankar, Vembu. **Conversión de energía electromecánica.** México: Alfaomega, 1995.
15. Megraw, Ferry *et. al.* **The theories and modeling of the kilowatt-hour meter.** Estados Unidos de América: s.e. 2002.
16. Mroczkowski, Robert. **Electric connector handbook: Technology and applications.** Estados Unidos de América: McGraw Hill. 1997.
17. Schmelcher, Theodor. **Manual de baja tensión.** Alemania: Siemens Aktiengesellschaft. 1982.
18. **Soft drive product guide.** Estados Unidos de América: s.e. s.a.
19. **Smart choices for motor management.** Estados Unidos de América: Rockwell International. 1999.