

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MODERNIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS
DE LAS BOMBAS DE AGUA DE CONDENSACIÓN DE LAS
PLANTAS DE REFRIGERACIÓN # 1 y 3 DEL METRO DE
CARACAS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Chacón F., Samuel E.
Para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2016

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MODERNIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS
DE LAS BOMBAS DE AGUA DE CONDENSACIÓN DE LAS
PLANTAS DE REFRIGERACIÓN # 1 y 3 DEL METRO DE
CARACAS**

PROFESOR GUÍA: Prof. Alexander Cepeda

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Ramón Muñoz

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Chacón F., Samuel E.
Para optar al título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2016

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 29 de julio de 2016

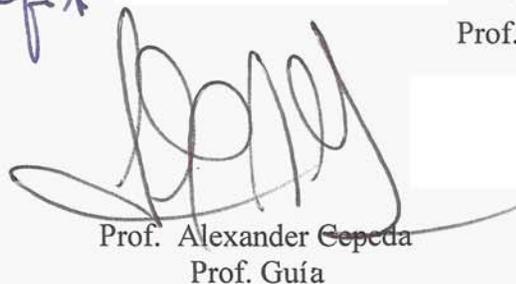
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Samuel E. Chacón F., titulado:

“MODERNIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE LAS BOMBAS DE AGUA DE CONDENSACIÓN DE LAS PLANTAS DE REFRIGERACIÓN 1 Y 3 DEL METRO DE CARACAS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Wilmer Malpica
Jurado


Prof. Alexis Barroso
Jurado


Prof. Alexander Cepeda
Prof. Guía

DEDICATORIA

Principalmente a DIOS el Padre y a Jesucristo mi salvador y redentor por ayudarme a vencer las adversidades, darme fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida, acompañarme y aconsejarme durante toda mi existencia.

A mi esposa Jennifer por ser mi compañera, ayuda idónea en cada paso que doy, su amor y paciencia.

A mi abuela Petra por los principios y valores que me inculco así como sus innumerables oraciones para mi éxito en los estudios y en la vida.

A mis padres que por su apoyo y paciencia que permitieron que lograra esta meta.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Reconocimiento a la empresa Metro de Caracas por permitirme contribuir en su desarrollo sostenido. A todas aquellas personas que colaboraron dentro de esta empresa y hago un especial reconocimiento al Ingeniero Augusto Zambrano, el Ingeniero Ramón Muñoz quienes laboran dentro del Metro que me apoyaron en la realización de este trabajo.

Agradezco a la empresa Corpivensa en especial al Ing. Juan Pablo Sánchez y al Ingeniero Eduardo Álvarez por el apoyo prestado en el suministro de manuales, normas, catálogos y asesoría necesaria para la realización de este proyecto.

Al Ingeniero Daniel Passariello quien me brindo un apoyo al facilitarme un material bibliográfico indispensable para el desarrollo teórico de este trabajo, así como agradezco sus consejos, ánimo y empuje para que culminara de manera satisfactoria esta meta.

A mi suegra Dolores Piña de Nieto por el apoyo incondicional en el préstamo de cámaras, impresoras, computadoras y demás materiales que hicieron posible que este trabajo estuviera culminado con gran calidad y en el tiempo requerido.

A mi hijo José Enrique Castro por toda la ayuda brindada en los últimos instantes para la entrega de este Trabajo de Grado, que hicieron fácil los últimos momentos de estrés.

CHACÓN F., SAMUEL E.

**MODERNIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS
DE LAS BOMBAS DE AGUA DE CONDENSACIÓN DE LAS
PLANTAS DE REFRIGERACIÓN # 1 y 3 DEL METRO DE
CARACAS**

Prof. Tutor: Ing. Alexander Cepeda. Tutor Ing. Industrial: Ramón Muñoz. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Metro de Caracas. Trabajo de Grado. 2016. 112 h. + anexos.

Palabras Claves: Tablero de control y potencia; Bombas de condensado de agua; componentes eléctricos; Selección de contactores, relés; Arrancador suave; tiempo de arranque de motores.

Resumen. Se plantea el diseño de un tablero de fuerza y control para las bombas de condensado de agua ubicadas en las Plantas Centrales de Refrigeración 1 y 3 del Metro de Caracas. En él se detalla el análisis por medio de cual se determina cada uno de los componentes principales: breakers, contactores, relés térmicos de protección, transformadores de control. Se selecciona una solución comercial como arrancador para los motores eléctricos, el cual es de tipo electrónico y ofrece ventajas notables en cuanto al ahorro energético y mantenimiento de equipamiento a largo plazo. A su vez se hacen las sugerencias necesarias para la aplicación de sus capacidades de comunicación para así permitir el accionamiento y automatismo remoto de dichas bombas.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
RECONOCIMIENTO Y AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
1 Descripción del proyecto.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Descripción del trabajo de grado.....	6
1.4 Objetivo general.....	9
1.5 Objetivos específicos.....	10
1.6 Limitaciones.....	11
CAPÍTULO II.....	12
2 Marco teórico.....	12

	Pág.
2.1 Descripción general de las condiciones iniciales de trabajo dentro de Metro de Caracas	12
2.1.1 Elementos que conforman un sistema de refrigeración.....	13
2.1.1.1 Chiller.....	13
2.1.1.2 Torre de enfriamiento	13
2.1.1.3 Bomba.....	14
2.1.1.4 Unidad de manejo de aire (UMA).....	15
2.1.1.5 Fan-Coil.....	15
2.1.1.6 Ventilador.....	16
2.1.1.7 Compresor.....	16
2.1.1.8 Sistemas centrales (Agua Helada)	16
2.2 Tiempo de arranque.....	19
2.3 Interruptor automático.....	22
2.4 Contactor.....	24
2.4.1 Criterio para la elección de un contactor.....	25
2.5 Relé Térmico.....	26
2.6 Sensor de flujo o flujóstato.....	28
2.6.1 Tipos de sensores de flujo.....	28
2.6.1.1 De pistón.....	28
2.6.1.2 De paleta (compuerta).....	28
2.6.1.3 De elevación (tapón).....	29
2.6.2 Consideraciones para la determinación de un flujóstato.....	30
2.7 Arranque de motores de inducción.....	30
2.7.1 Selección del arrancador suave.....	32
2.7.2 Ventajas del arrancador suave con respecto a otros sistemas de arranque.....	32
2.7.3 Inconvenientes de los arrancadores suaves.....	33
2.7.4 Funcionamiento de un arrancador suave.....	34
2.7.5 Comparación del arrancador suave respecto a otros tipos de arranque.....	36
2.7.5.1 Beneficios adicionales.....	37

2.7.5.2 Comunicación Remota.....	40
2.7.5.3 Criterios de selección de un arrancador suave.....	41
2.8 Fusibles de protección.....	41
2.8.1 Fusibles ultra rápidos.....	42
2.8.2 Dimensionamiento de un fusible ultra rápido.....	43
2.9 Filosofía de funcionamiento de las bombas de condesado de agua.....	44
CAPÍTULO III.....	45
3 Metodología.....	45
3.1 Selección de los elementos del tablero de control del motor de la bomba de condesado de agua.....	45
3.1.1 Determinación del tiempo de arranque.....	48
3.1.2 Determinación de la curva de perfil de corriente del motor Baldor modelo EM2555T-4.....	49
3.1.3 Determinación de la corriente de cortocircuito del motor Baldor modelo EM2555T-4.....	50
3.1.4 Determinación de nivel de cortocircuito mediante simulación de Etap 12	54
3.1.5 Determinación de curva de daño térmico del motor Baldor en forma teórica ..	55
3.2 Determinación del cableado de potencia.....	56
3.2.1 Calculo de la curva de daño de un conductor.....	59
3.2.2 Selección de protección de conductores eléctricos	61
3.3 Determinación de los componentes del tablero.....	63
3.3.1 Determinación del arrancador suave.....	64
3.3.2 Determinación de fusibles ultra rápidos.....	65
3.3.3 Determinación del contactor.....	69
3.3.4 Determinación del relé de protección térmica.....	70
3.3.5 El breaker o interruptor automático.....	71
3.3.6 Determinación del interruptor magnético térmico de control.....	78
3.3.7 Transformador de control.....	82
3.4 Determinación de los componentes externos al tablero de control y potencia.....	83

3.4.1 Determinación del flujóstato (sensor de flujo).....	83
CAPÍTULO IV.....	85
Resultados.....	85
4.1 Descripción del sistema original del tablero.....	85
4.2 Esquema final del tablero eléctrico.....	87
CONCLUSIONES.....	90
RECOMENDACIONES.....	94
Bibliografía.....	95
Referencias bibliográficas	97
ANEXOS.....	98

Nota: solo en la versión digital se verán planos en tamaño original con respecto a los anexos impresos.

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Categorías de trabajo para los contactores en corriente alterna según norma IEC 158-1.....	25
2. Datos de placa del motor BALDOR EM2555T-4 100HP, 1780RPM, 3F, 60Hz.....	45
3. Datos de desempeño típico sin valores garantizados del motor BALDOR...46	
4. Límites permisibles de la tensión de servicio del sistema en el punto de medición (norma COVENIN 159-2005).....	47
5. Límites permisibles de la tensión de servicio del sistema en el punto de medición (norma CADAPE 42-87).....	47
6. Designación de KVA-CODE por letra Norma Nema-Mg1	49
7. Multiplicadores de reactancia (o impedancias) de máquinas para la combinación de red.....	52
8. .Curva térmica de motores eléctricos	55
9. Resumen de cálculos de los conductores.....	59
10. Selección de fusible para los conductores.....	62
11. Múltiplos de la corriente de fusión del fusible aR WEG es mayor que la corriente de sobrecarga para el mismo tiempo de duración de la misma.....	66
12. Características técnicas que hace referencia a I^2t por modelo de fusible aR WEG.....	68
13. Valores de corriente y tiempo calculados de la curva de corriente que se muestra en la figura 5.....	73
14. Datos tomados de la curva del relé de protección térmica para llevarlos junto con la curva de interruptor Mag-Break.....	73

15. Capacidad de corrientes de breakers y Mag-Break protector de circuito de motor.....	74
16. Consumo de los componente del sistema de control por máquina.....	79
17. Lista de elementos originales del tablero de control de las bombas de condensado de agua.....	85
18. Lista de elementos seleccionado para el nuevo tablero de control de las bombas de condensado de agua.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Diagrama de bloques del sistema de bombeo de las bombas de agua condensada.....	7
2. Torres de enfriamiento Planta de Refrigeración 2 Metro de Caracas Los Caobos.....	18
3. Evolución de la velocidad durante el arranque.....	20
4. Tiempo de arranque en función de T_m	21
5. Curva típica de corriente contra velocidad de un motor de corriente alterna en arranque directo.....	23
6. Curvas de par motor M , par resistente M_s y el par resultante $M-M_s$	24
7. Curva típica de relé de protección térmica.....	27
8. Diagrama de sensor de Flujo tipo paleta.....	29
9. Ejemplo de una conexión de un arrancador comercial de WEG.....	35
10. Comparación de los distintos tipos de arranque: estrella-triángulo, directo y arranque suave.....	36
11. Reacción ante sobrecorriente y sobretensiones del arrancador.....	38
12. Arranque recomendado para control de bombas.....	39
13. Representación de la carcasa del arrancador suave modelo escogido SSW06 de WEG.....	39
14. Intensidad vs tiempo funcionamiento típico de un fusible ultra rápido.....	42
15. Curva perfil de corriente de motor Baldor modelo EM2555T-4.....	50
16. Rango de valores x/r para motores trifásicos de inducción.....	53
17. Simulación en Etapa de los niveles de cortocircuito.....	54
18. Curva de perfil de corriente vs. Curva de daño térmico del motor Baldor.....	56
19. Protección de un conductor 3/0 por medio de un fusible.....	63

20. Muestra de catálogo online de un arrancador suave marca ABB recomendado por Baldor (julio 2016).....	65
21. Tiempo de fusión del fusible vs Corriente presumida FUSIBLE FNH2 aR.....	67
22. Variación de I^2t Total x tensión de trabajo.....	69
23. Curva del relé de protección térmica de la serie RW317-1D, marca WEG, con rango de ajuste de 100 – 215A.....	71
24. Curva de disparo del breaker Mag-Break 36150 de GE en Tab 6.....	75
25. Curva del relé térmico, el breaker y la corriente de arranque	76
26. Representación total de las curvas de perfil de corriente de motor, daño de motor y daño de conductor entre otras.....	78
27. Curva de disparo para interruptores magneto térmicos serie E90 de Maresa.....	81
28. Caída de presión en comparación con el caudal, F61series.....	84
29. Tablero de control de Bomba de condensado de agua en planta de refrigeración 1 Metro de Caracas.....	86
30. Circuito de potencia de la gaveta para las bombas de agua condensada usando nomenclatura (norma de simbología IEC 60617)	89

INTRODUCCIÓN

El Metro de Caracas es la compañía de transporte masivo más grande de la ciudad capital, destacándose por el uso de diversas tecnologías; siendo en su mayoría instalaciones subterráneas, se hizo necesario para el confort del usuario la implantación de un sistema de aire acondicionado bien estructurado. Este sistema de aire acondicionado se le denomina a nivel industrial sistema de refrigeración y está conformado por las siguientes sub-sistemas a nivel macro:

Sistema de agua helada

Sistema de agua condensada

A nivel general se tiene los siguientes componentes: chillers, unidades de manejo de aire, extractores bajo plataforma, ventiladores de emergencia, bombas de agua helada, torres de enfriamiento, bombas de agua condensada etc. y esto solo contando la parte hidromecánica, no hay que olvidar el sistema de energía que propulsa todo esto formado por: transformadores, centro de control de motores, tableros de distribución, etc.

Es importante resaltar que la implementación de nuevas tecnologías no se corresponde con el simple hecho de “mantenerse al día” o remplazo por no ser un equipo actual, el ¿Por qué? de estos cambios radica en ventajas económicas y tecnológicas que un sistema moderno pueda reportar. La implementación de un sistema de fuerza y control, que gobierne de forma eficiente las bombas de agua condensada en los sistemas de refrigeración del Metro de Caracas es el punto de partida para proponer soluciones realmente competitivas que ayuden al avance tecnológico del país y a su mejor funcionamiento.

Este proyecto se ha dividido en cuatro partes o capítulos cuyos contenidos son los siguientes:

PRIMER CAPÍTULO se menciona y explica lo relativo al anteproyecto: el problema planteado, su justificación, descripción del trabajo, sus objetivos y limitaciones.

SEGUNDO CAPÍTULO con ayuda de una base teórica se fijan contenidos a cerca del arranque y la forma de trabajo de sistema, que forman parte de la investigación; conceptos, criterios y normas que soportan el desarrollo del mismo. Además de conceptos teóricos del funcionamiento de elementos tales como: breaker, contactores, relés térmicos, etc.

TERCER CAPÍTULO con la ayuda de normas nacionales e internacionales se ajuntan los detalles que permiten la determinación correcta de los interruptores, contactores, relés térmicos y demás dispositivos, así como también de los componentes externos necesarios para la automatización del sistema, sin olvidar el cableado de potencia.

CUARTO CAPÍTULO exponen los resultados y hacen las conclusiones, se nombra la bibliografía utilizada que respalda la investigación y se presentan los anexos para completar la información de algunos capítulos según se requiera.

CAPÍTULO I

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Han transcurrido varias décadas de la fundación del Sistema Metro de Caracas y la tecnología en diversos lugares ha cambiado y/o mejorado en aspectos importantes, el sistema de aire acondicionado en algunas estaciones ya lleva más de 40 años en funcionamiento llegando al límite de su vida útil y mermando la eficiencia de estos equipos. Recientemente se han adquiridos nuevos sistemas de aire acondicionado y en algunos casos ya fueron instalados, en otros están por instalarse y otros fueron restaurados. Es por ello que se hace necesaria la modernización de los sistemas eléctricos de fuerza y control para toda la planta, mediante la aplicación de ciertas técnicas basadas en normas y estándares nacionales e internacionales, correspondientes a los aspectos de refrigeración, motores, cableado, canalizaciones, entre otros. Se deben adaptar los tableros y controladores así como también los sistemas de protecciones de dichas plantas de refrigeración, además de otros ámbitos correspondiente a la Ingeniería Eléctrica. En el presente proyecto se le dio prioridad al diseño del tablero de control y fuerza del sistema de bombas de agua condensada de la Planta de Refrigeración 1 (PR1) cuya ubicación es cercana a la estación en Plaza Sucre en Catia y de la Planta de Refrigeración 3 (PR3) ubicada cerca la estación de metro de Chacaíto del Metro de Caracas.

Se tiene que hacer mención que estos motores en su mayoría estaban con arranque directo, vale la pena destacar que para el año 2012 todas las PR estaban en funcionamiento mientras que en junio 2016 ninguna lo está.

Basándose en criterios teóricos y normas se diseñó un tablero para el control y fuerza para los sistemas de bombas de agua condensada para las PR1 y PR3. Las Bombas de agua condensadas (BAC) son las que permiten condensar el refrigerante

que se encuentra evaporado en el chiller devolviéndolo a su estado líquido, después de esto el agua es desalojada y enviada para bajar su temperatura a la torre de enfriamiento.

El presente trabajo tuvo como fin determinar los procedimientos y las metodologías para la modernización de las instalaciones de sistemas eléctricos de fuerza y control de las bombas de condensado de agua de las Plantas de Refrigeración 1 (PR1) y Planta de Refrigeración 3 (PR3).

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los sistemas eléctricos son aquellos que permiten la activación de maquinarias y circuitos mediante las aplicaciones de corrientes a través de los conductores, no son sistemas estándares por tanto deben adaptarse al uso y al nivel energético requerido. En el Metro de Caracas el sistema de refrigeración fue modernizado en parte, en PR1 (a nivel de motores y bombas) y por modernizar PR3, se instalaron nuevos equipos tales como: chillers, bombas de agua para sistemas de agua helada y condensada, también se modificaron, se realizó la colocación de los conductores a estructuras aéreas para la canalización nueva, puesto que las antiguas eran subterráneas, incrementando la seguridad en caso de inundación, en algunas ocasiones se improvisaron tableros de control y de fuerza, en otros permanece el mismo tablero desde hace más de 40 años.

Para un correcto funcionamiento de las plantas de refrigeración, la modernización de dichos tableros se hace imperativa. El tablero de control será el dispositivo que se encarga de controlar en este caso las bombas de condensado de agua en el mencionado sistema de refrigeración de PR1 y PR3; señalando cuando arrancan, se adicionan, paran y rotan. Actualmente este sistema solo cuenta con piezas, electromecánicas: relés instantáneos, contactores y breakers, autotransformadores de control y otros dispositivos mecánicos como sensores de flujo, siéndo obsoletos antes

nuevas tecnologías que han surgido en los últimos años y muchos de estos dispositivos mencionados no funcionan correctamente o son inexistentes. Se ha de hacer mención que la mayoría de los motores que accionan las bombas esta puesto en arranque directo.

Otra desventaja de los tableros actualmente instalados es su poca automatización, casi nula en algunos casos (solo funciones parada y arranque están presente), en consecuencia, su activación dependerá exclusivamente del ser humano, el cual debiera dedicarse solo a la supervisión de dichas plantas y encargarse de eventos de emergencia. El aumento de horas hombre y horas de mantenimiento debido a paradas innecesaria es otro factor que incentiva para que se tomen cartas en el asunto con respecto a esta modernización con el fin de abaratar los costos de operación.

En Venezuela han aparecido en estas últimas décadas componentes y dispositivos electrónicos de última generación, supliendo los componentes electromecánicos con que venían funcionado estos tableros haciéndolos más confiables y baratos.

La elaboración de este trabajo se basa en la modernización de este tipo de tablero mediante un nuevo diseño; usándose para ello componentes que están presente en el mercado nacional a un precio accesible. Mejorándose con este diseño la confiabilidad, autonomía, vida útil, y reduciendo las rutinas de mantenimiento, y/o las paradas innecesarias del sistema.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

Se inició este trabajo de grado con un arqueo de información bibliográfica relacionada con el tema de bombas de agua y de plantas de refrigeración, con la recopilación de las normas nacionales y otras internacionales que regulan la implementación de los sistemas eléctricos que gobiernan estos dispositivos. Por lo tanto se hizo necesario un levantamiento en planta de los equipos instalados así como la comprensión de la interacción de los mismos.

Determinada la capacidad y características de la carga mediante el cálculo de la potencia máxima consumida y la capacidad de cortocircuito del cableado de la instalación se puede vislumbrar que tipo de dispositivos se usarán. Estos factores son de vital importancia en el buen funcionamiento del sistema; es preponderante saber la corriente máxima absorbida durante el arranque de las bombas y las caídas de tensión que se producen.

Siguiendo con el análisis se selecciona los diferentes componentes que requiere el tablero: interruptores, switches de potencia, relés térmicos, contactores y fusibles. Cada uno de ellos debe ser adaptado a las características de potencia, corriente de arranque y régimen de trabajo que requiere, para su funcionamiento eficiente.

Este sistema de bombeo de agua de condensación en su implementación no cuenta con switches de nivel y de presión, esto se debe a que otro sistema llamado bombas de agua potable garantiza el caudal de agua agregándola cuando, esta se pierde por evaporación en la torre de enfriamiento. El sistema de agua condensada puede ser representado en forma sencilla con el siguiente diagrama de bloques (ver figura 1).

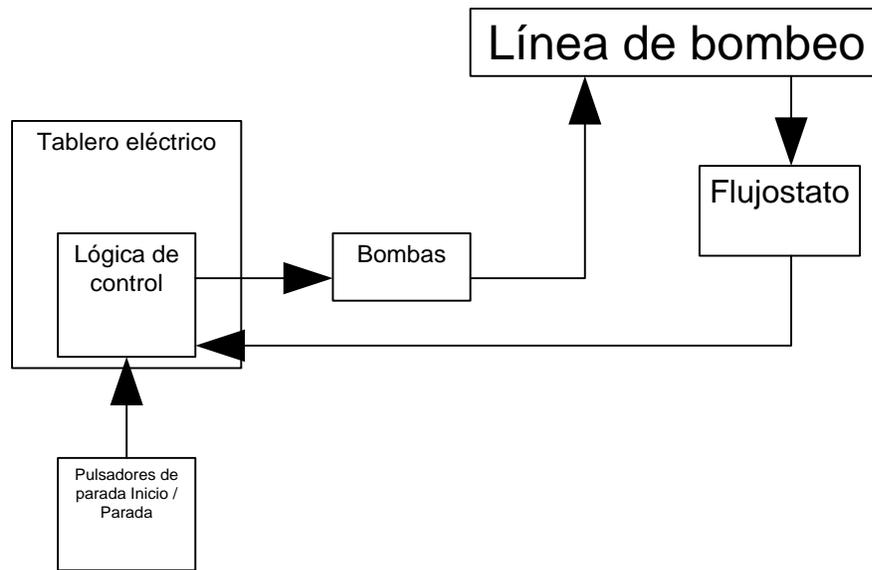


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de bombeo de las bombas de agua condensada

Existen señales de control para nuestro sistema de bombeo estas básicamente serán dos:

1. Los pulsadores de inicio o parada.
2. El sensor flujóstato o flujo switch.

Los pulsadores serán los controles manuales de inicio o parada de los motores por parte del operario, estos están ubicados físicamente en el gabinete de control de motores.

El flujóstato es un switch que enviara su señal de parada si y solo si el flujo de líquido, en nuestro caso de agua, cesa o disminuye a un nivel no detectable por este sensor, apagando el motor que acciona la bomba cuando este caudal no es suficiente, así la bomba no trabajará en vacío. Este dispositivo es ajeno a las gavetas de control, se encuentra dentro de las tuberías, lo cual será explicado en el Capítulo 2. Se le considera fundamental pues este protege a la bomba más no al motor y es una señal de control importante.

Una vez determinado por medio del análisis y siguiendo las normas, se compila toda la información recabada en el levantamiento de campo, y esto permite realizar el esquema eléctrico completo del tablero de control y potencia de las bombas de agua de condensación, donde se observó con detalle qué elementos forman parte del sistema y cuál es la interacción que existe entre ellos.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Modernizar las instalaciones eléctricas de las bombas de agua de condensación de las plantas de refrigeración 1 y 3 del Metro de Caracas según su normativa interna y complementándose con normas nacionales e internacionales.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar los sistemas de enfriamiento de las plantas centrales de refrigeración 1 y 3 (PR1 y PR3) del Metro de Caracas desde el punto de vista eléctrico determinando sus características principales y las condiciones de operación de las bombas de agua de condensación.
2. Realizar un diagnóstico del estado físico de equipos y sistemas eléctricos, de las plantas centrales de refrigeración.
3. Elaboración de las especificaciones requeridas para el proyecto según la normativa de la C.A. Metro de Caracas, complementándose con otros estándares nacionales e internacionales.
4. Establecer una configuración que mejore la funcionalidad del tablero de control del sistema de bombas de condensación
5. Realizar el proyecto con el nuevo sistema eléctrico según las especificaciones elaboradas.

1.6 LIMITACIONES

Para hacer el levantamiento de campo y las respectivas mediciones se debió realizar en compañía del personal autorizado de la empresa, por ello en ocasiones no se tenía el acceso debido a la no disponibilidad de personal, incidiendo de manera importante en el factor tiempo. Los sistemas instalados en su mayoría tienen más de 40 años y las especificaciones técnicas manuales y/o planos ya no están disponibles en la empresa, en este sentido se tuvo que ubicar dicha información para realizar este trabajo la cual en ocasiones no se consiguió y se empezó de cero.

Las condiciones iniciales de trabajo es importante mencionarlas:

1. Se encuentra instalados motores nuevos marca Baldor modelo EM2555T-4 con sus respectivas bombas.
2. La mayoría de los motores de las bombas de condensación de agua están en arranque directo. En 2016 ninguna de estas plantas está en funcionamiento dejando a Línea 1 del Metro de Caracas con más de 50% de sus estaciones sin climatización.

Estos puntos mencionados simplifican este Trabajo de Grado ya que no se tomara en cuenta el tema de selección de un motor eléctrico.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

Se presenta en este capítulo la mayoría de los aspectos más relacionados con la teoría, los cuales constituyen el soporte que sirve de base para el diseño del tablero eléctrico de control y potencia del equipo de bombeo. Lo que permitirá analizar desde este ángulo de perspectiva y con el máximo detalle posible, cada uno de los componentes que conforman este tablero y así poder hacer la mejor selección, adaptada a las necesidades de la empresa.

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES INICIALES DEL TRABAJO DENTRO DEL METRO DE CARACAS

Es necesario mencionar que antes de la ejecución este Trabajo de Grado la compañía Metro de Caracas, ya había adquirido unos motores los cuales fueron colocados en las plantas de refrigeración 1 y 3, es por ello que la selección de motor no aplica, además hay que recordar que gran parte de estos motores esta conectados con arranque directo, mediante esta información se deben adaptar los cálculos de los tableros a las características de funcionamiento que requieren dichos motores, por ello este capítulo se iniciará en cómo encontrar teóricamente el tiempo de arranque de dichos motores, el cual representa un cálculo indispensable para determinar las protecciones necesarias.

Se deben entender los conceptos básicos de los elementos de un sistema de refrigeración para comprender que función desempeña una bomba de condensado de agua (BAC), aun cuando estos conceptos corresponden más al área de ingeniería mecánica son necesarios incluirlos para entender este sistema con claridad.

2.1.1 Elementos que conforman un sistema de refrigeración:

2.1.1.1 Chiller

“Un *chiller* (o enfriador de agua) es un aparato industrial que produce agua fría para el enfriamiento de procesos industriales. La idea consiste en extraer el calor generado en un proceso por contacto con agua a una temperatura menor a la que el proceso finalmente debe quedar. Así, el proceso cede calor bajando su temperatura y el agua, durante el paso por el proceso, la eleva. El agua ahora "caliente" retorna al *chiller* adonde nuevamente se reduce su temperatura para ser enviada nuevamente al proceso”.

[1]

“Un *chiller* es un sistema completo de refrigeración que incluye un compresor, un condensador, evaporador, válvula de expansión (evaporación), refrigerante y tuberías, además de bomba de impulsión de agua a/desde el proceso, sistema electrónico de control del sistema, depósito de agua, gabinete, etc.”[1]

“Distintos procesos requieren alimentarse con distintos caudales, presiones y temperaturas de agua. El agua se puede enfriar a temperaturas finales que alcanzan los 20°C o inclusive temperaturas negativas con la adición de anticongelantes, como por ejemplo -20°C.” [1]

2.1.1.2 Torre de enfriamiento

“Una torre de refrigeración es una instalación que extrae calor del agua mediante evaporación o conducción.”[1]

“Cuando el agua es reutilizada, se bombea a través de la instalación en la torre de enfriamiento. Después de que el agua se enfría, se reintroduce como agua de proceso. El agua que tiene que enfriarse generalmente tiene temperaturas entre 40 y 60 °C. El agua se bombea a la parte superior de la torre de enfriamiento y de ahí fluye hacia abajo a través de tubos de plástico o madera. Esto genera la formación de gotas.

Cuando el agua fluye hacia abajo, emite calor que se mezcla con el aire de arriba, provocando un enfriamiento de 10 a 20°C.”[1]

“Parte del agua se evapora, causando la emisión de más calor. Por eso se puede observar vapor de agua encima de las torres de refrigeración.” [1]

“Para crear flujo hacia arriba, algunas torres de enfriamiento contienen aspas en la parte superior, las cuales son similares a las de un ventilador. Estas aspas generan un flujo de aire ascendente hacia la parte interior de la torre de enfriamiento. El agua cae en un recipiente y se retraerá desde ahí para al proceso de producción.” [1]

“Existen sistemas de enfriamiento abiertos y cerrados. Cuando un sistema es cerrado, el agua no entra en contacto con el aire de fuera. Como consecuencia la contaminación del agua de las torres de enfriamiento por los contaminantes del aire y microorganismos es insignificante.” [1]

2.1.1.3 Bomba

“Una bomba es una turbo máquina para líquidos. La bomba se usa para transformar la energía mecánica en energía hidráulica. Las bombas se emplean para bombear toda clase de líquidos (agua, aceites de lubricación, combustibles ácidos, líquidos alimenticios, cerveza, leche, etc.), éste grupo constituye el grupo importante de las bombas sanitarias. También se emplean para bombear los líquidos espesos con sólidos en suspensión, como pastas de papel, melazas, fangos, desperdicios, etc. Un sistema de bombeo puede definirse como la adición de energía a un fluido para moverse o trasladarse de un punto a otro.”[1]

“Una bomba centrífuga es una máquina que consiste en un conjunto de paletas rotatorias encerradas dentro de una caja o cárter; o una cubierta o carcasa. Las paletas imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga. Uno de los factores más importantes que contribuyen al creciente uso de bombas centrífugas ha sido el desarrollo universal de la fuerza eléctrica.”[1]

2.1.1.4 Unidad de manejo de aire (UMA)

“Una UMA es un aparato de acondicionamiento de aire que se ocupa de mantener caudales de aire sometidos a un régimen de temperatura preestablecida. También se encarga de mantener la humedad dentro de valores apropiados, así como de filtrar el aire.”[1]

“Por sí mismos no producen calor ni frío; este aporte les llega de fuentes externas (caldera o máquinas frigoríficas) por tuberías de agua o gas refrigerante. Puede, no obstante, haber un aporte propio de calor mediante resistencias eléctricas de apoyo incorporadas en algunos equipos.”[1]

“La unidad manejadora de aire es capaz de velar por los tres parámetros elementales de la calidad del aire acondicionado que se resumen en: bajo articulado en suspensión, humedad relativa bajo control y temperatura de confort. El objetivo de la UMA es suministrar un gran caudal de aire acondicionado para ser distribuido por una red de ductos a través de la instalación en la cual se encuentra emplazada.” [1]

2.1.1.5 Fan-Coil

“Es un sistema de acondicionamiento y climatización de tipo mixto que resulta ventajoso en edificios donde es preciso economizar el máximo de espacio. Suple a los sistemas centralizados que requieren de grandes superficies para instalar sus equipos. Los *Fan-Coil* se sitúan en cada ambiente a acondicionar a los cuales llega el agua helada. Allí el aire es tratado e impulsado con un ventilador al local a través de un filtro. De este modo, cuando el aire se enfría es enviado al ambiente transmitiendo el calor al agua que retorna siguiendo el circuito.”[1]

2.1.1.6 Ventilador

“Es una máquina de fluido concebida para producir una corriente de aire mediante un rodete con aspas que giran produciendo una diferencia de presiones. Entre sus aplicaciones, destacan las de hacer circular y renovar el aire en un lugar cerrado para proporcionar oxígeno suficiente a los ocupantes y eliminar olores, principalmente en lugares cerrados; así como la de disminuir la resistencia de transmisión de calor por convección.”[1]

“Se utiliza para desplazar aire o gas de un lugar a otro, dentro de o entre espacios, para usos industriales o residenciales, para ventilación o para aumentar la circulación de aire en un espacio habitado, básicamente para refrescar. Por esta razón, es un elemento indispensable en climas cálidos.”[1]

2.1.1.7 Compresor

“Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.”[1]

2.1.1.8 Sistemas Centrales (Agua Helada).

“Estos sistemas se caracterizan por tener equipos de refrigeración centralizados y comunes en todos los ambientes, siendo el agua (se conoce como helada por su baja temperatura) el medio utilizado para el enfriamiento y deshumidificación del aire. El agua es procesada centralmente por un equipo conocido como enfriador o CHILLER.

Para cumplir su objetivo utiliza un sistema de tuberías y bombas, a través de los serpentines (evaporadores) de la UMA'S, las cuales están ubicadas ya sea en el interior o fuera del ambiente o conjunto de locales.”[1]

“Este tipo sistema es utilizado generalmente cuando se requieren grandes capacidades de refrigeración. Básicamente consta de una unidad o varias unidades enfriadores (CHILLER) donde cada una está constituida por compresores, condensador, evaporador y válvulas de expansión. El evaporador es un serpentín por dentro de cuyos tubos, circulan el refrigerante y exteriormente el agua, es aquí donde se lleva a cabo el proceso de intercambio de calor. El agua del enfriador circula a lo largo de las tuberías de las UMA's y/o FanCoils, el aire interior desplazado por el ventilador, pasa a través de los serpentines en donde (el aire) disminuye su temperatura.”[1]

“Este sistema también permite una gran individualidad a los ambientes locales acondicionados, ya que el área servida por cada UMA's y/o FanCoil, es acondicionado independientemente y por lo tanto el control de temperatura y humedad responde a las condiciones particulares de este espacio.”[1]



Figura 2 Torres de enfriamiento Planta de Refrigeración 2 Metro de Caracas Los Caobos.

2.2 TIEMPO DE ARRANQUE

La obtención de tiempo de arranque de un motor es fundamental para establecer las protecciones eléctricas.

“La ecuación que expresa la 2ª ley de Newton es:

$$C_m - C_r = d(J \cdot \Omega) / dt \quad [\text{ec. 1}]$$

En esta ecuación tenemos que:

C_m = Par motor (N·m)

C_r = Par resistente (N·m)

J = Inercia de las masas de los motores (kg·m²)

Ω = Velocidad angular (rad/s) o (s⁻¹)

Esta ecuación se puede desarrollar derivando el segundo término de la siguiente forma:

$$C_m - C_r = d(J \cdot \Omega) / dt = J \cdot d(\Omega) / dt + \Omega \cdot d(J) / dt \quad [\text{ec. 2}]$$

En la mayor parte de los accionamientos, la inercia es constante, luego $d(J) / dt = 0$, y en estos casos, que son más frecuentes, la ecuación queda:

$$C_m - C_r = J \cdot d(\Omega) / dt \quad [\text{ec. 3}]$$

que es su forma más conocida.

$$C_m - C_r = J \cdot d\Omega / dt \quad [\text{ec. 3}]$$

La integración de esta ecuación nos da el tiempo de arranque.”[2]

$$t_a = \int_{\Omega=0}^{\Omega=\Omega_N} \frac{J}{C_m - C_r} \cdot d\Omega \quad [\text{ec. 4}]$$

“En esta integral definida, los límites son respectivamente la velocidad inicial al comienzo del proceso $\Omega = 0$, y al final que normalmente es la nominal del punto de funcionamiento $\Omega = \Omega_N$.”[2]

En la figura 3 se ve la curva de evolución de velocidad.

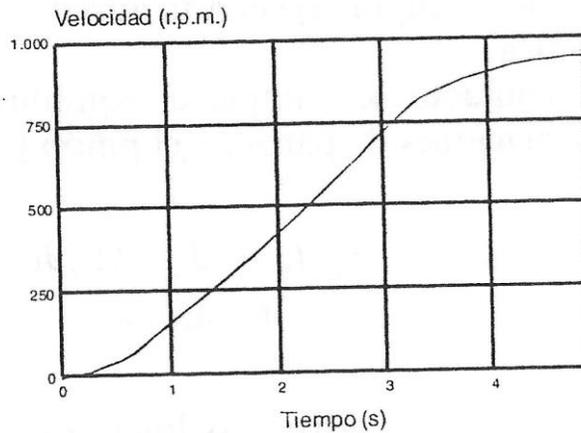


Figura 3. Evolución de la velocidad durante el tiempo de arranque. [2]

“La integración de la ecuación da el tiempo de arranque tiene un caso particular cuando el par motor tiene la expresión como se ve a continuación:

$$C_m = C_{m\acute{a}x} \cdot \frac{2}{\frac{s}{s_{m\acute{a}x}} + \frac{s_{m\acute{a}x}}{s}} \quad [\text{ec. 5}]$$

El par resistente para este caso particular se toma $C_r = 0$.”[2]

“La integración directa da para el tiempo de arranque como:

$$t_a = \frac{J \cdot \Omega_0}{2 \cdot C_{m\acute{a}x}} \left[\frac{1 - s_N^2}{s \cdot s_{m\acute{a}x}} - s_{m\acute{a}x} \cdot \ln(s_N) \right] \quad [\text{ec. 6}]$$

Si definimos como constante de tiempo de arranque como:

$$T_m = J \cdot \Omega_0 / C_{m\acute{a}x} \quad [\text{ec. 7}]$$

Que se interpreta como el tiempo necesario para arrancar, aplicando durante todo el tiempo el par máximo $C_{m\acute{a}x}$, entonces el tiempo de arranque sera:

$$t_a = \frac{T_m}{2} \left[\frac{1 - s_N^2}{s \cdot s_{m\acute{a}x}} - s_{m\acute{a}x} \cdot \ln(s_N) \right] \quad [\text{ec. 8}]$$

Para ver el tiempo t , que transcurre hasta llegar al punto de deslizamiento s , bastara sustituir t_a por t , y s_N por s . La función se representa en la figura 4.”[2]

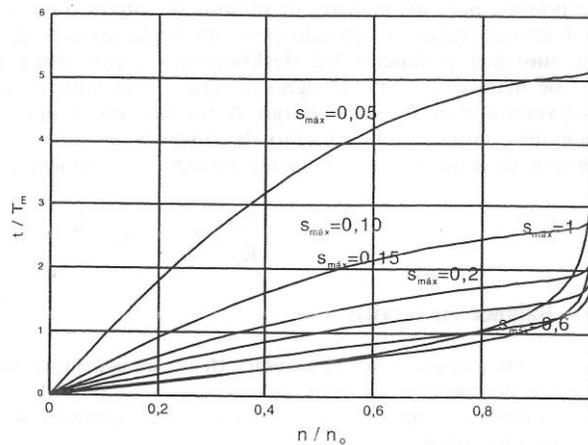


Figura 4. Tiempo de arranque en función de T_m . [2]

“También es interesante deducir una fórmula para el cálculo rápido del tiempo de arranque en supuesto aproximado de que el par acelerador medio, $C_a = C_m - C_r$, es constante en todo el campo de velocidad y se expresa en función del par nominal C_N del motor y, por lo tanto, de su potencia P_N y velocidad Ω_N nominales:

$$t_a = \frac{J \cdot \Omega_N^2}{K \cdot P_N} \quad [\text{ec. 9}]$$

En esta fórmula, además de las variables conocidas, tenemos:

K = Relación entre el par medio de aceleración y el par nominal.

P_N = Potencia del motor en [W].

En esta fórmula se modifica para emplear unidades más comunes:

$$t_a = 0,000010966 \frac{J \cdot n^2}{K \cdot P_N} \quad [\text{ec. 10}]$$

En la que:

P_N = Potencia del motor en [kW].

n_N = Velocidad del motor en [r.p.m.]”[2]

2.3 INTERRUTOR AUTOMÁTICO

“Este debe tener la capacidad de permitir el arranque de la unidad todas las veces que se ponga en marcha y alcance la velocidad nominal; si se bloquea el motor por cualquier razón, debe dispararse protegiendo la máquina.” [3]

“Un motor de inducción de jaula de ardilla diseño B, según NEMA (National Electrical Manufacturers Association), tiene un gran pico de la corriente de arranque mientras se pone en marcha; para los primeros 5 a 8 ciclos alcanza de 5 a 6 veces la corriente nominal, disminuyendo en la medida en que se acerca a la velocidad nominal, en la forma como se observa en la figura 5. En cada arranque del motor la corriente describirá esta evolución y el interruptor, destinado a dar protección requerida al motor y al equipamiento, no deberá dispararse, pues estas serán condiciones normales de funcionamiento.”[3]

“Este tiempo de arranque, que habrá que calcular, es importante para determinar una protección adecuada. Aunque como es sabido, muchas veces los fabricantes de las unidades de bombeo no suministran los datos necesarios para tal cálculo, sino que hay

que hacerlo, en forma aproximada o experimental, con datos obtenidos producto de la experiencia y la observación, con muy poco apoyo de la teoría.” [3]

Para el caso en estudio se solicitó a Baldor (empresa fabricante de motores) los datos faltantes para calcular el tiempo de arranque y en octubre 2013 esta empresa modificó la hoja de datos del motor en cuestión.

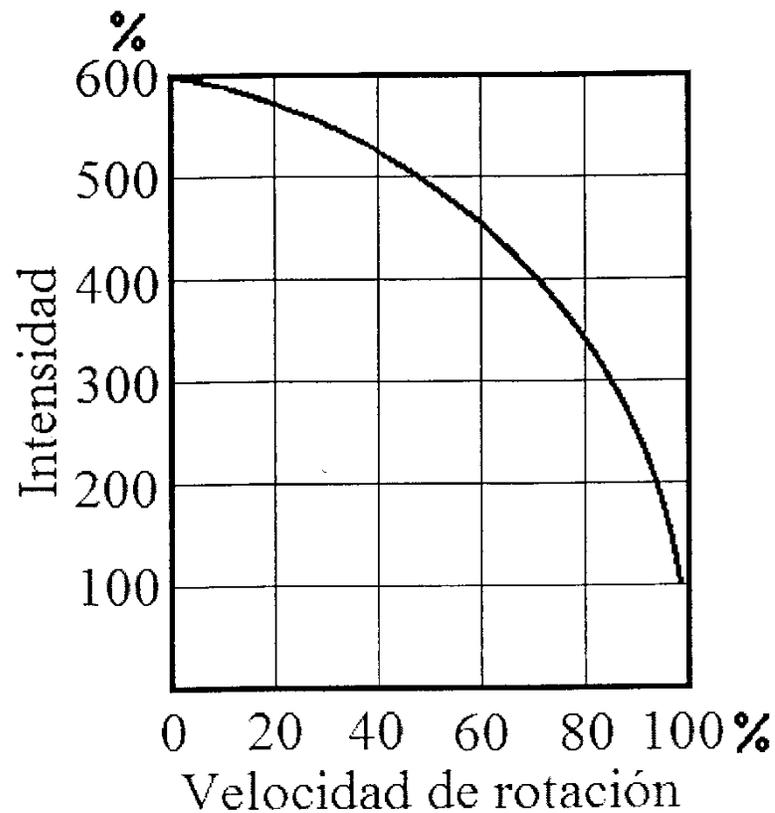


Figura 5. Curva típica de corriente contra velocidad de un motor de corriente alterna en arranque directo [3]

“Analizaremos el tipo de interruptor y su curva basándonos en dos hechos: la evolución de la corriente de arranque del conjunto motobomba, mostrada en la figura 5, y su tiempo de duración; para ello, se parte de la ecuación que rige la dinámica de

funcionamiento de la unidad: la ecuación de equilibrio de los pares par a un movimiento de rotación:

$$[3] \quad M - Ms = j \frac{d\omega}{dt} \quad - \quad [ec. 11]$$

Nota: las ecuaciones 11 y 3 son idénticas pero tiene distinto nombre de variables que representa las mismas cantidades físicas, se dejó así para respetar las condiciones de reseña que mostro el autor original.

“Donde **M** (C_m) representa el par desarrollado por el motor; **Ms** (C_r), el par resistente de la bomba; **j**, el momento de inercia total correspondiente a todas las masas giratorias; ω la velocidad angular del eje de la unidad; y t , el tiempo. La figura 6 muestra las curvas de par.” [3]

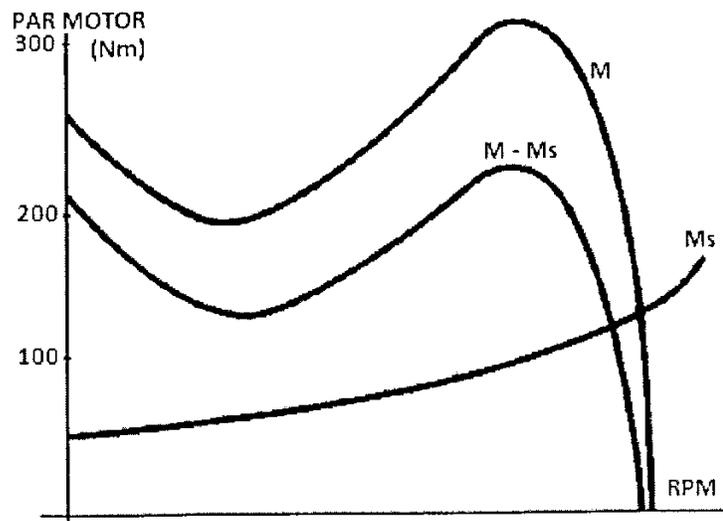


Figura 6. Curvas de par motor M , par resistente M_s y el par resultante $M-M_s$ [3]

2.4 CONTACTOR

“La base teórica donde se sustenta la selección del contactor para el diseño se encuentra en la norma IEC 158-1, en ella se establece las categorías de trabajo de los

contactores en corriente alterna según el tipo de carga empleada, en la que se distingue, entre otros tipos de carga, la que nos interesa, la de un rotor de jaula de ardilla.”[3]

“En esta parte de establecen las condiciones en que se hace la conexión y el tipo de corte de corriente de la máquina, pues forman condiciones distintas para el arranque y parada de la máquina cuando esta alcance su velocidad nominal, ya que afecta directamente al transitorio de arranque. Ver Tabla 1” [3]

Tabla 1 Categorías de trabajo para los contactores en corriente alterna según norma IEC 158-1. [3]

Categoría	Aplicaciones típicas	Funcionamiento normal						Funcionamiento Temporal						
		Conexión			Desconexión			Conexión			Desconexión			
		I In	V Vn	Cos ϕ	I In	V Vn	Cos ϕ	I In	V Vn	Cos ϕ	I In	V Vn	Cos ϕ	
AC1	Cargas no inductivas o ligeramente inductivas	1	1	0,95	1	1	0,95	2	1,1	0,95	2	1,1	0,95	
AC2	Motores de anillos rozantes: arranque, parada, Inversión del motor	2,5	1	0,65	2,5	1	0,65	4	1,1	0,65	4	1,1	0,65	
AC3	Motores de jaula de ardilla: arranque (sin inversión)	In <17A	6	1	0,65	1	0,2	0,65	10	1,1	0,65	8	1,1	0,65
		In <100A	6	1	0,65	1	0,2	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35
		In >100A	6	1	0,65	1	0,2	0,35	8	1,1	0,35	6	1,1	0,35
AC4	Motores de jaula de ardilla: arranque (con inversión en marcha)	In <17A	6	1	0,65	6	1	0,65	12	1,1	0,65	10	1,1	0,65
		In <100A	6	1	0,35	6	1	0,35	12	1,1	0,35	10	1,1	0,65
		In >100A	6	1	0,35	6	1	0,35	10	1,1	0,35	8	1,1	0,35
AC11	Relés y dispositivos de control. Contactos auxiliares	10	1	0,70	1	1	0,4	11	1,1	0,70	11	1,1	0,70	

2.4.1 Criterios para la elección de un contactor

“Debemos tener en cuenta algunas cosas, como las siguientes:

1. El tipo de corriente, la tensión de alimentación de la bobina y la frecuencia.
2. La potencia nominal de la carga.

3. Si es para circuito de potencia o de mando el número de contactos auxiliares que se necesita.
4. Para trabajos silenciosos o con frecuencias de maniobras muy altas es recomendable el uso de contactores estáticos o de estado sólido. ” [4]

2.5 RELÉ TÉRMICO

“Para la protección por relés térmicos partiremos del hecho expresado en la ecuación

[3] $I^2t = Constante$ ----- [ec. 12]

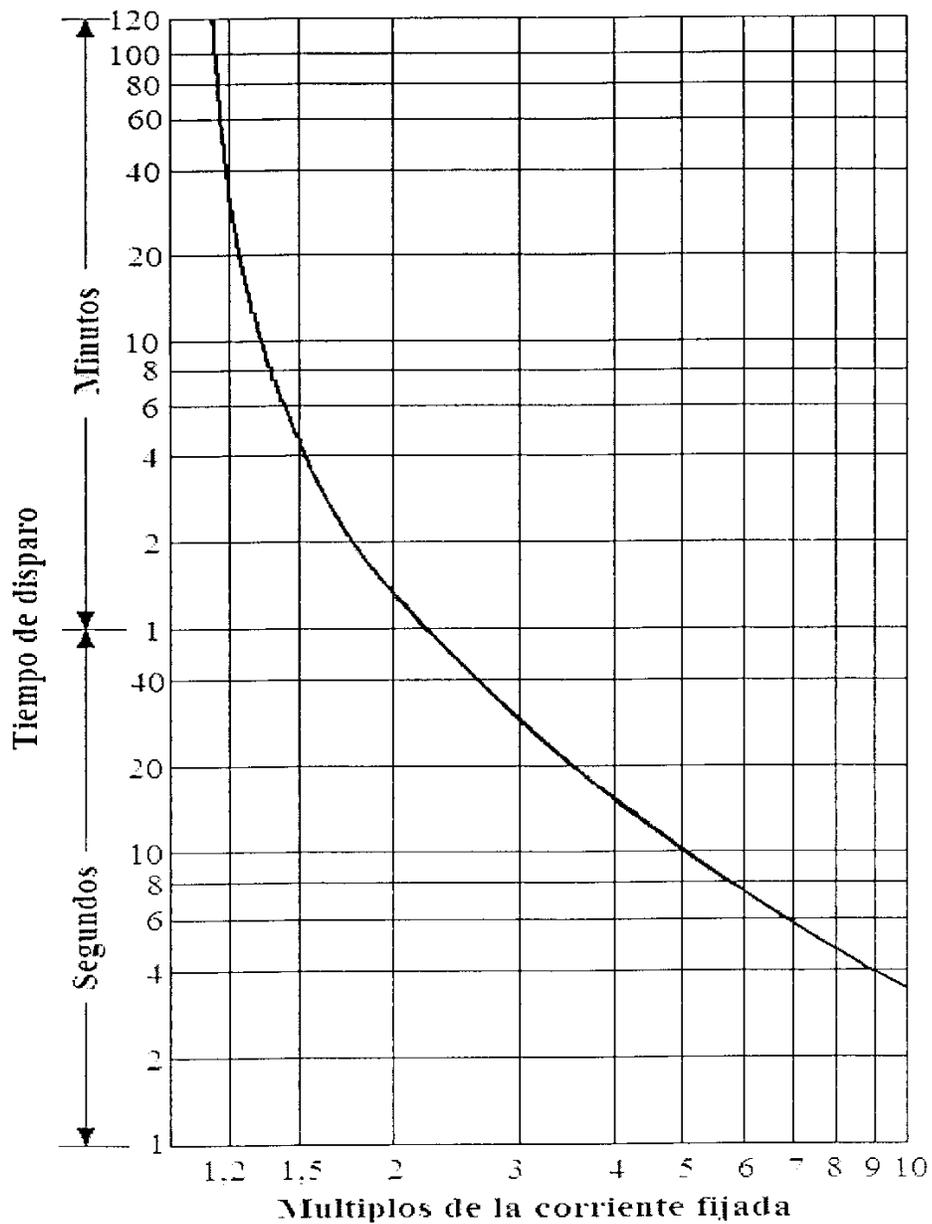


Figura 7. Curva típica de relé de protección térmica.[3]

“Curva que corresponde al calor que se produce por una corriente que circula a través de una resistencia determinada. Donde I representa el valor eficaz de la corriente y t es el tiempo.”[3]

“Esta es la expresión analítica de la curva de tiempo de disparo en función de la intensidad. La cual se expresa el tiempo que debe transcurrir desde el momento en

que se produce la sobrecarga hasta que se desconecta el elemento de mando. La figura 7 muestra la curva hiperbólica de la ecuación 12.”[3]

2.6 SENSOR DE FLUJO O FLUJOSTATO

Este sensor es ajeno al tablero de control pero emite una señal de control fundamental solo dedicada a la protección mecánica de la bomba para que esta no trabaje en vacío, este actuará inmediatamente apagando el motor en caso que no exista flujo de agua.

“El sensor de flujo es un dispositivo que, instalado en línea con una tubería, permite determinar cuándo está circulando un líquido o un gas.”[5]

“Estos son del tipo apagado/encendido; determinan cuándo está o no circulando un fluido, pero no miden el caudal. Para medir el caudal se requiere un caudalímetro.”[5]

2.6.1. Tipos de sensores de flujo

2.6.1.1 De pistón

“Es el más común de los sensores de flujo. Este tipo de sensor de flujo se recomienda cuando se requiere detectar caudales entre 0,5 LPM y 20 LPM (LPM = litro por minuto).”[5]

2.6.1.2 De paleta (compuerta)

“Este modelo es recomendado para medir grandes caudales, de más de 20 LPM.”[5]

“Su mecanismo consiste en una paleta que se ubica transversalmente al flujo que se pretende detectar. El flujo empuja la paleta que está unida a un eje que atraviesa herméticamente la pared del sensor de flujo y apaga o enciende un interruptor en el exterior del sensor.”[5]

“Para ajustar la sensibilidad del sensor se recorta el largo de la paleta.”[5]

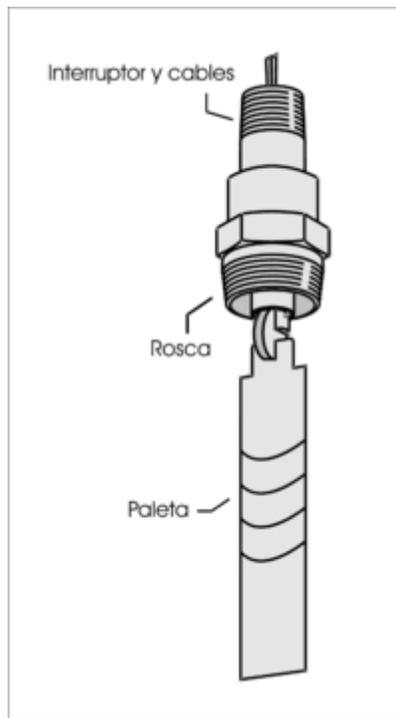


Figura 8 Diagrama de sensor de Flujo tipo paleta [5]

“El que se tiene instalado en el metro es de paleta por la gran cantidad de flujo manejado y su fiabilidad ante sustancias ajenas al fluido.”[5]

Cabe mencionar que este último tipo de sensores es el más utilizado en el Metro en las Plantas de refrigeración.

2.6.1.3 De elevación (tapón)

“Este modelo es de uso general. Es muy confiable y se puede ajustar para casi cualquier caudal.”[5]

“Su mecanismo consiste en un tapón que corta el flujo. Del centro del tapón surge un eje que atraviesa herméticamente la pared del sensor. Ese eje empuja un interruptor ubicado en el exterior del sensor.”[5]

“Para ajustar la sensibilidad del sensor se perforan orificios en el tapón.”[5]

2.6.2 Consideraciones para la determinación de un flujóstato:

“Para determinar el tipo de sensor de flujo se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

“Caudal de disparo: se debe seleccionar un sensor más sensible si se requiere detectar flujos muy bajos.”[5]

“Pérdida de presión: al colocar cualquier objeto en el paso de un fluido se está reduciendo en alguna medida su presión. La presión de salida siempre va a ser menor a la de entrada, siendo el sensor de tapón el que más reduce la presión y el sensor de paleta el menos intrusivo.”[5]

“Impurezas en los fluidos: los sólidos en los fluidos pueden obstruir el sensor de pistón. En cambio, el sensor de paleta es el que menos se ve afectado por los sólidos.”[5]

“Tipo de fluido: se debe seleccionar un sensor que esté fabricado con materiales que soporten el tipo de fluido que vamos a detectar. La temperatura, presión, acidez y densidad son factores que se deben tomar en cuenta para seleccionar los materiales.” [5]

2.7 Arranques de motores de inducción

Existen varios tipos de arranque de motores, pero los encontrados dentro de las instalaciones del Metro, básicamente eran de tres tipos: arranque directo, arranque estrella-triángulo y arrancador suave

Explicaremos algunos tipos de arranque:

- Arranque directo

Se dice que un motor arranca en forma directa cuando a sus bornes se aplica directamente la tensión nominal a la que debe trabajar.

Si el motor arranca a plena carga, el embobinado 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. La intensidad de corriente durante la fase de arranque puede tomar

valores entre 6 a 8 veces mayores que la corriente nominal del motor. Su principal ventaja es el elevado par de arranque: 1,5 veces el nominal.

- Arranque estrella-triángulo

El arranque estrella-triángulo es el procedimiento más empleado para el arranque a tensión reducida debido a que su construcción es simple, su precio es reducido y tiene una buena confiabilidad.

El procedimiento para reducir la tensión en el arranque consiste en conmutar las conexiones de los arrollamientos en los motores trifásicos previstos para trabajar conectados en triángulo en la red de 3 x 380 V.

Los bobinados inicialmente se conectan en estrella, o sea que reciben la tensión de fase de 208 V, y luego se conectan en triángulo a la tensión de línea de 480 V; es decir que la tensión durante el arranque se reduce 1,73 veces.

- Arranque mediante resistencia en serie con el estator
- Arranque mediante reactancias en serie con el estator
- Arranque con transformador y auto transformador
- Arranque mediante conmutación estrella triángulo
- Arranque mediante bobinado parcial
- Arranque con el motor de varias velocidades
- Arranque con motor auxiliar
- Arranque con bobinado partido

Cada uno de estos arranques están explicados en profundidad en el libro de “Arranque industrial de motores asincrónicos” de José M. Merino A

Estos tienen sus ventajas y desventajas lo que los adecuada en cada caso particular.

Uno de los arranques que ofrece ventajas notables en la protección de los sistemas hidráulicos como los que se están tratando es el “arrancador suave o estático”, este disminuye significativamente el golpe de ariete lo cual es importante tomar en cuenta en nuestro caso ya que ayuda a la conservación de la integridad o resistencia de aquellas

tuberías de larga data de uso y entre otra de las posibles ventajas de su implementación está el ahorro energético.

2.7.1 SELECCIÓN DEL ARRANCADOR SUAVE

“Los sistemas de arranque clásicos de motores eléctricos tienen el inconveniente tomar valores de intensidad mayores a la corriente nominal (típicamente 8 veces más), indicada en la placa característica del motor.”[6]

“Otro inconveniente que tienen estos arranques son los periodos de paro instantáneos que se producen en los cambios de conexión, por ejemplo el paso de conexión estrella a triángulo, o el paso de una conexión a otra en el caso de arranque por autotransformador.”[6]

“El arrancador suave es un arrancador estático que permite arrancar suavemente un motor de inducción asíncrono de rotor en cortocircuito, aumentándole progresivamente la tensión desde cero voltios hasta la tensión nominal (0 a 480 V); es decir, ejerce un control sobre la tensión durante el tiempo que se establece el arranque.”[6]

“Bajo esta misma filosofía de funcionamiento, permite la parada de un motor de manera gradual, es decir, disminuyendo progresivamente la tensión de alimentación del motor, desde el valor nominal hasta un valor cero.”[6]

2.7.2 VENTAJAS DEL ARRANCADOR SUAVE CON RESPECTO A OTROS SISTEMAS DE ARRANQUE

“Al utilizar un controlador de motor, se obtiene, desde el punto de vista técnico:

- Una limitación de la intensidad de arranque controlando la tensión aplicada y consiguiendo reducir con ello gastos innecesarios de energía y sobrecalentamiento en los motores.
- Control del valor de la tensión en el proceso de parada, permitiendo realizar una parada suave, ideal para aplicaciones de electrobombas.

- Ahorro energético
- Protege el motor ante sobrecalentamiento de sus devanados.
- Mayor seguridad mecánica en la máquina que acciona el motor.
- Contactos libres de potencial para diversas aplicaciones.
- Elimina las tensiones mecánicas que se producen en el arranque de motores y, en general, en cualquier acoplamiento, al efectuar el arranque de una manera suave, de tal manera que evita dañar los productos que están siendo movidos por las máquinas (en nuestro caso conserva la vida útil de la empacaduras de las tuberías que retiene el agua, disminuye el golpe de ariete).
- Se eliminan los problemas clásicos arrancadores estrella-triángulo.
- Se pueden ajustar, a voluntad, los parámetros de rampa de arranque, rampa de parada y par de arranque.
- Evita el desgaste mecánico que puedan sufrir las máquinas en el arranque y parada de manera tan brusca.

Todo ello contribuye a una reducción en los costos de las reparaciones y una prolongación de la vida útil de los motores.” [6]

2.7.3 INCONVENIENTES DE LOS ARRANCADORES SUAVES

“Los arrancadores estáticos (arrancadores suaves) también tiene algunos pequeños inconvenientes transitorios, que solo existen durante el proceso de arranque; los efectos que provocan las corrientes que salen de los arrancadores estáticos, al no ser ondas senoidales puras, generan armónicos que producen en el motor perdidas por calentamientos, ruidos y vibraciones.”[6]

“Los inconvenientes más representativos son:

- Pérdidas en el motor, porque la tensión de alimentación durante el arranque no es senoidal.

- Debido a que el valor de la alimentación baja durante el arranque, el calentamiento del estator es mayor y existen pérdidas por el efecto Joule.
- El deslizamiento durante el arranque es mayor, lo que provoca un mayor calentamiento del rotor.
- La impedancia de un motor eléctrico es variable, dependiendo de la intensidad real del motor y del valor de su deslizamiento.
- Si se tienen que instalar condensadores para mejorar el factor de potencia, se deben instalar aguas arriba del arrancador estático.”[6]

2.7.4 FUNCIONAMIENTO DE UN ARRANCADOR SUAVE

“Una vez conectado el circuito de potencia del arrancador suave a tensión nominal se aplica tensión al circuito de control; al recibir éste tensión, automáticamente va aumentando ésta gradualmente, a la salida del circuito de potencia del arrancador (dependiendo de la situación de los potenciómetros de ajuste), hasta llegar al 100% de la tensión nominal de alimentación, consiguiendo con ello arrancar suavemente el motor.”[6]

“Los arrancadores estáticos de lazo cerrado comparan el valor consigna, introducido por el usuario, con los valores que proceden del transductor, que consignan valores instantáneos. Los transductores pueden ser transformadores de intensidad, tensión, encoder o dinamo tacométrica.”[6]

“El resultado de esta comparación pasa al dispositivo de regulación dando como resultado que el ángulo de conducción de tiristores sea mayor o menor, en función del valor que le llega.”[6]

“Un arrancador estático será más preciso cuanto más se aproxime al valor de consigna.”[6]

“La intensidad del arranque se puede ajustar hasta cinco veces el valor de la intensidad nominal.”[6]

“Al alcanzar el motor el 100% de la tensión de alimentación, los semiconductores de potencia quedan punteados con un relé electromecánico, quedando el motor directo con la línea.”[6]

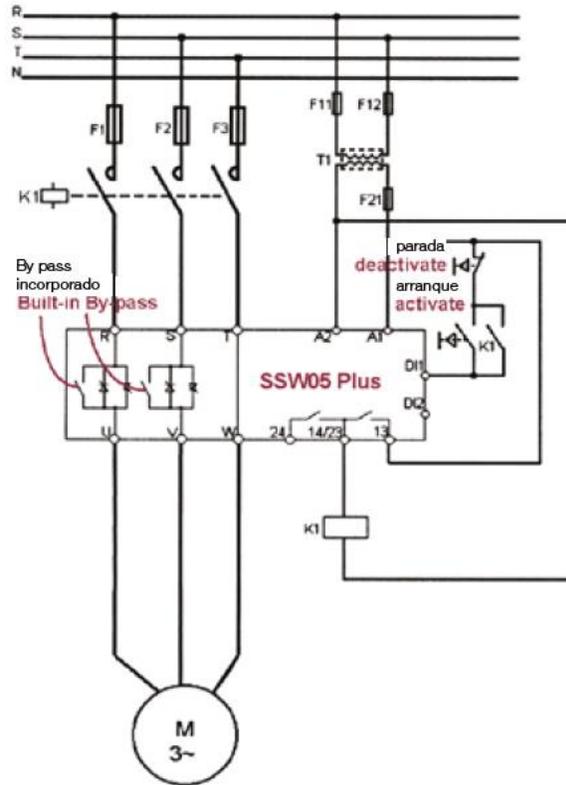


Figura 9. Ejemplo de una conexión de un arrancador comercial [7]

2.7.5 Comparación del arrancador suave respecto a otros tipos de arranques

A continuación una comparación de diferentes tipos de arranque:

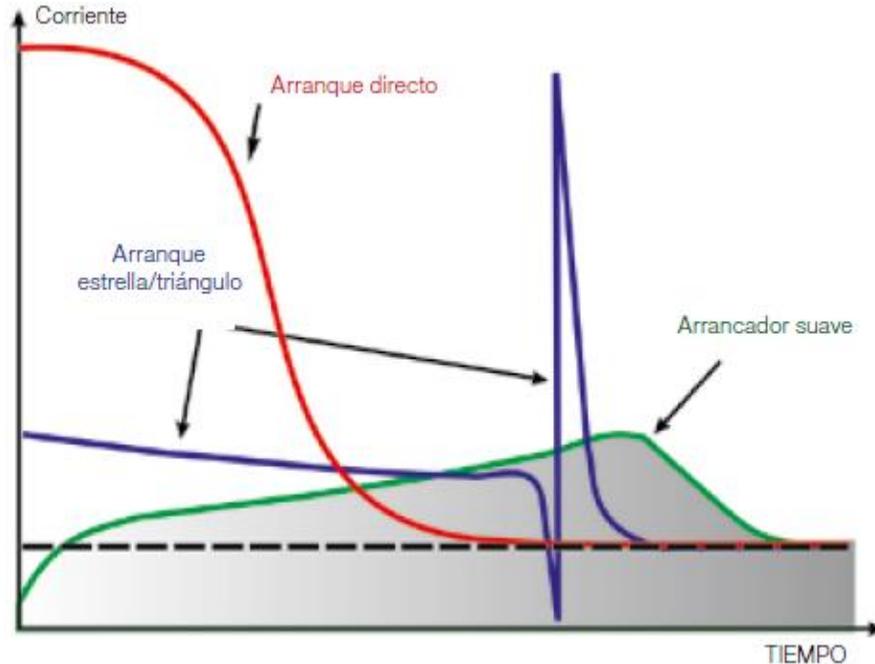


Figura 10. Comparación de los distintos tipos de arranque: estrella-triángulo, directo y arranque suave.

Observando detenidamente la figura 10 el arranque de color rojo es el directo y es el que actualmente se tiene instalado en las bombas de las plantas de refrigeración 1 y 3, se evidencia el impacto de la intensidad de corriente en la potencia consumida en el arranque. El arranque estrella-triángulo, de color morado, posee un cambio brusco de estado como se puede ver lo cual no lo hace candidato como solución, por el estrés que este causa en las partes mecánicas de la motobomba. La solución de esta propuesta es la de arrancador suave o estático, este nos ofrece el equilibrio entre ahorro energético y protección mecánica.

2.7.5.1 Beneficios adicionales:

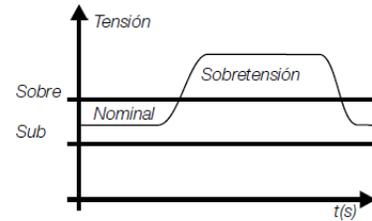
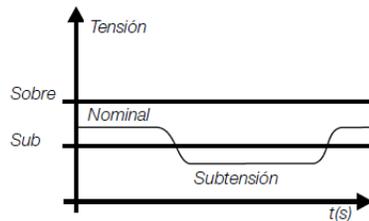
- “32-bit RISC microcontrolador de alto rendimiento.
- Protección electrónica del motor.
- HMI extraíble con display doble (LED/LCD).
- Métodos de control totalmente programables.
- Control de par (torque) totalmente flexible.
- Función “Kick-start” para cargas con alta inercia.
- Función “Pump control” para el control inteligente de los sistemas de bombeo.
- Evita el “golpe de ariete” en bombas.
- Limita los picos de corriente en la red.
- Limita la caída de tensión durante los arranques.
- Tensión Universal (220 a 575 Vac).
- Fuente de alimentación conmutada con filtro EMC (94Vca a 253Vca).
- Bypass incorporado en los modelos de 10A hasta 820A, permite tamaño reducido, ahorro de energía y aumento de la vida útil del Arrancador Suave.
- Memoria back-up de la protección del motor I^2t imagen térmica.
- Protección contra desequilibrio de tensión y de corriente.
- Protección contra sobre/sub tensión y corriente.
- Entrada para PTC del motor.
- Reducción del estrés sobre acoplamientos y equipos de transmisión (reductores, roldanas, correas, etc...).
- Aumento de la vida útil del motor y del sistema mecánico de la máquina accionada.
- Fácil operación, programación y mantenimiento vía HMI.
- Instalación eléctrica y mecánica sencilla.

- Puesta en marcha orientada.
- Posibilidad de conexión estándar o conexión dentro del Triángulo del motor (conexión 6 cables).
- Todas las protecciones y funciones están disponibles en los dos tipos de conexiones.
- Protección contra errores de comunicación serie o Fieldbus.
- Operación en ambiente hasta 55°C (sin reducción de corriente) para modelos 10A a 820A, y hasta 40°C (sin reducción de corriente) para modelos 950A a 1400A.
- Certificaciones Internacionales: IRAM, C-Tick, UL, cUL, y CE”[7]

Protecciones resaltantes:

Sub y Sobretensión

Permite ajuste de los límites para protección contra subtensión y sobretensión. Disponible para los dos tipos de conexión al motor.



Sub y Sobrecorriente

Permite ajuste de los límites para protección contra subcorriente y sobrecorriente.

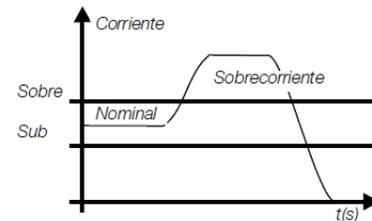
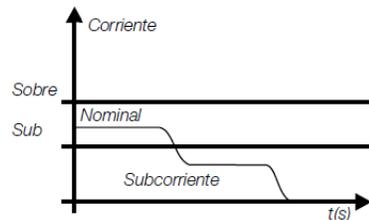


Figura 11. Reacción ante sobrecorriente y sobretensiones del arrancador. [7]

Método de arranque recomendado para bombas de agua:

Pump Control

La función "Pump Control" proporciona una desaceleración suave que evita el "Golpe de Ariete"

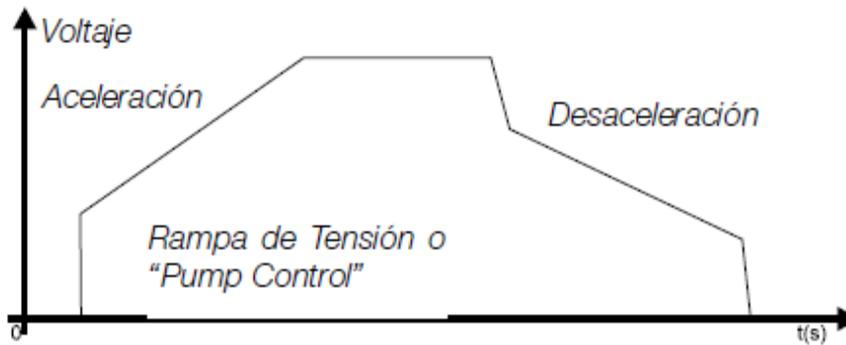


Figura 12 Arranque recomendado para control de bombas [7]

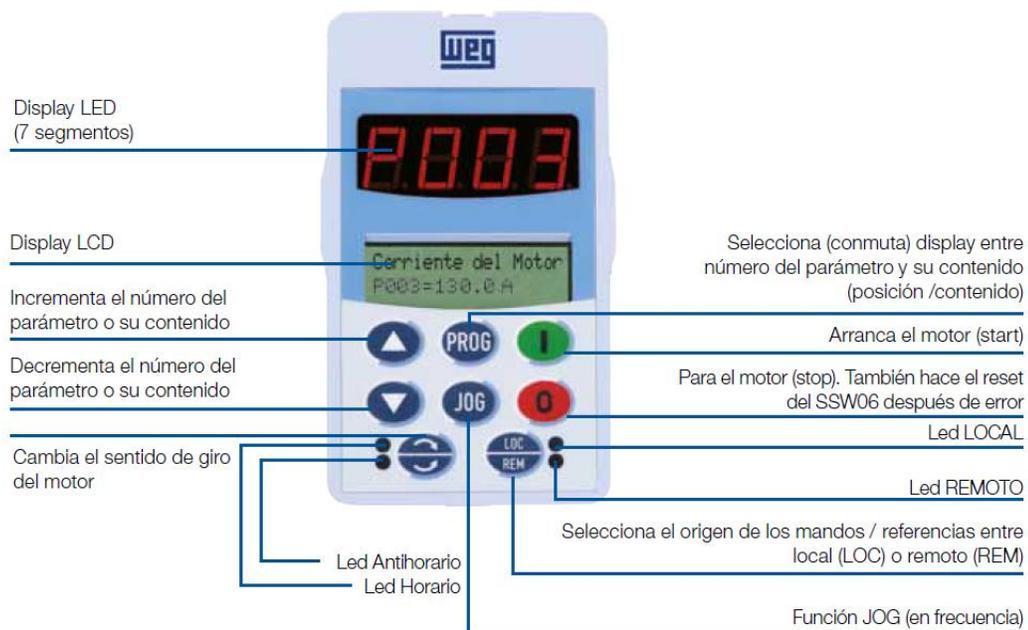


Figura 13. Representación de la carcasa del arrancador suave [7]

2.7.5.2 Comunicación remota:

“Los arrancadores Suaves pueden operar en redes de comunicación “Fieldbus” a través de los protocolos estandarizados más conocidos mundialmente:

Tipos de Fieldbus soportados:

- Modbus RTU
- Profibus D
- Profibus DPV1
- DeviceNet
- DeviceNet Acyclic
- Ethernet/IP
- Ethernet/Modbus/TCP”[7]

“Destinadas principalmente para integrar plantas de automatización (sistemas), redes de comunicación rápidas, ofrece ventajas en el monitoreo y en el control “on-line” del Arrancador Suave proporcionando un elevado rendimiento y una gran fiabilidad operacional; son características exigidas en las aplicaciones de sistemas complejos y/o interconectados.”[7]

“Para la interconexión en redes de comunicación en redes de comunicación “Fieldbus”, Profibus DP, Profibus DPV1, DeviceNet, DeviceNet Acyclic, Ethernet/IP o Ethernet/Modbus/Tcp, Los Arrancadores Suaves SSW-06 necesitan un módulo opcional, de acuerdo con el protocolo deseado. En el caso de Modbus RTU se puede utilizar RS-232 (disponible como estándar en el SSW-06) o la interfaz RS-485 (opcional).”[7]

Además de todas las ventajas de monitoreo de las protecciones y del control de los accionamientos del motor también se pueden utilizar las entradas digitales, salidas digitales y analógicas como una unidad remota de I/O’s del maestro de red “Fieldbus”. Para mayor información de este dispositivo y sus opcionales ver anexos 9 A al anexo 9 C inclusive.

2.7.5.3 Criterios de selección de un arrancador suave

“Existen varios parámetros a tener en cuenta a la hora de dimensionar a la hora de dimensionar un arrancador suave entre los cuales sobresalen:

1. Corriente nominal del motor: Es el factor más importante. La selección debe hacerse con la corriente de placa del motor en lugar de la potencia.
2. La aplicación: Una vez establecida la corriente es posible obtener un dimensionamiento preliminar del equipo. Sin embargo, la aplicación determina si debe usar un arrancador suave de mayor tamaño para ajustarse a las condiciones de operación.
3. La altura sobre el nivel del mar es otro factor a considerar. Por el desempeño térmico de la electrónica, la capacidad de corriente disminuye con la altura, pero solo debe ajustarse si la altura supera los 1000 metros sobre el nivel del mar, para el este Trabajo de Grado no implica caso no aplica.
4. Frecuencia de maniobra: Usualmente en la industria los equipos son accionados (ciclo encendido - apagado) una o muy pocas veces al día. En algunos casos particulares, las condiciones de operación exigen frecuencias de maniobras muy elevadas en cuyo caso se deben observar los límites máximos tanto del motor como del arrancador. Cuando el número de arranques por hora es alto debe ser necesario aumentar el tamaño del arrancador” [8]. Para este caso particular tampoco aplicaría este criterio.

2.8 Fusibles de protección

Es de hacer notar que un fusible es un dispositivo de protección para elementos eléctricos o electrónicos. Esta permitirá el paso de la corriente mientras esta no supera un valor específico.

En el presente proyecto de Metro y para nuestro tablero de control y fuerza existirán dos tipos de fusibles:

1. Fusible de potencia, este será colocado con el arrancador suave, pero sus características son especiales pues está diseñado específicamente para proteger dispositivos electrónicos, son llamados comercialmente fusibles ultra rápidos.
2. Fusible de protección para el transformador de control.

2.8.1 Fusibles ultra rápidos

“En Cortocircuito o sobrecarga, el elemento fusible de aplicación tradicional se funde, abriendo el circuito eléctrico, interrumpiendo el paso corriente.”[9]

“Durante el cortocircuito con la protección del fusible ultra rápido habrá una limitación de corriente de cortocircuito presumida conforme a la figura 14. Esta disminución drástica de la energía que el fusible ultra rápido permite pasar al circuito, es la gran diferencia para proteger una aplicación más sensible a pico de corriente como equipos electrónicos o semiconductores.”[9]

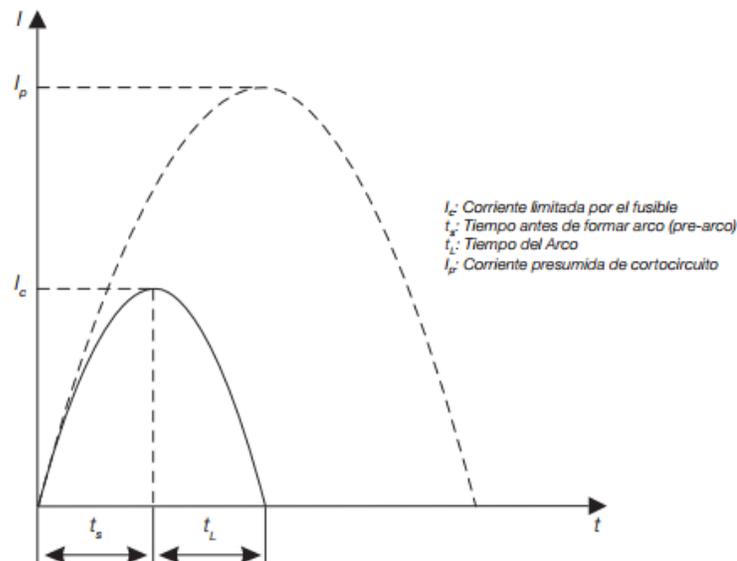


Figura 14. Intensidad vs tiempo funcionamiento típico de un fusible ultra rápido [9]

“Los Fusibles ultra rápidos son aplicados para la protección contra cortocircuitos de semiconductores que pueden ser encontrados, por ejemplo, en dispositivos de baja tensión como convertidores de frecuencia y arrancadores suaves.”[9]

“Los fusibles ultra rápidos son ensamblados en cuerpo cerámico de alta calidad, rellenos de arena de cuarzo impregnada, con elemento fusible en plata y terminales de cobre plateado.”[9]

“Esta estructura proporciona el óptimo aislamiento eléctrico, robustez mecánica y capacidad de resistencia contra choques térmicos durante la desconexión del fusible en valores de I^2t reducidos.”[9]

“Por ser fusibles ultra rápidos no poseen protección contra sobrecargas.”[9]

“Ellos no pueden operar arriba de su corriente nominal de acuerdo al indicado en la curva tiempo x corriente. Caso contrario, el fusible sufrirá una sobrecarga térmica que reducirá su capacidad de interrupción y su vida útil. De esta manera, es obligatorio el uso de algún dispositivo complementario de protección contra sobrecarga para la completa protección del equipo. Por otro lado, el fusible garantiza la protección impar de los semiconductores por limitar la corriente y la energía (I^2t) durante un cortocircuito.”[9]

“El fusible actúa rápidamente para altos valores de múltiplos de corriente, abriendo el circuito e impidiendo que el valor presumido de corriente de corto-circuito I_p sea alcanzado.”[9]

2.8.2 Dimensionamiento de un fusible ultra rápido

“Varias condiciones influyen en la capacidad de conducción de corriente de un fusible, por ejemplo, temperatura del ambiente, ventilación forzada y la sección transversal de las barras o cables. Vale la pena destacar que el caso cíclico de sobrecarga es la condición más determinante que puede causar la quema prematura del

fusible. Equipos que incorporan dispositivos semiconductores y consecuentemente fusibles ultra rápidos, son frecuentemente sometidos a las sobrecargas repetitivas o cíclicas. Bajo estas condiciones, las temperaturas en el elemento fusible pueden llegar a la fusión o fatigación, resultando en una operación indebida. Para evitar las consecuencias de las sobrecargas cíclicas se debe dimensionar el fusible ultra rápidos para que su corriente de fusión preferencialmente sea mayor que la corriente de sobrecarga por el mismo período de duración de la misma.”[9]

2.9 FILOSOFÍA DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS DE CONDENSADO DE AGUA

Los criterios en los cuales se enmarcará el funcionamiento de las motobombas se basa en las experiencias y el manejo típico que se le ha dado en este tipo de máquinas dentro del Metro de Caracas:

Para iniciar el funcionamiento de estas bombas se tiene que cumplir ciertas condiciones, lo primero es el voltaje nominal (480V), segundo debe existir flujo de agua, pues sino el sensor de flujo detendrá la bomba en ejecución. En condición de parada existirá un indicador de color rojo y en condición normal indicador verde.

Tanto en PR1 y PR3 existen: cuatro (4) Bombas de Agua Helada (BAH), cuatro (4) Bombas de Agua Condensada (BAC) y 4 chillers. No todas las bombas ni todos los chillers estarán encendidos y de acuerdo con las condiciones de operación que se establecieron en el Metro un grupo de funcionamiento normal debe estar conformado por: dos BAH, un BAC y un chiller, que deben estar en funcionamiento 24 horas x 7 días, es decir, 7 días a la semana 24 horas al día.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL TABLERO DE CONTROL DEL MOTOR DE LA BOMBA DE CONDESANDO DE AGUA

En general es normal colocar arranque directo a motores de inducción hasta 30 HP en 208 V, pero este no es el caso pues se tiene un motor que posee 100 hp en 480 V con lo cual el arranque directo no es recomendable por las caídas de tensiones que produce en la red de potencia y los niveles de corriente de arranque que se producen.

A continuación en la tabla 2 se recogen las características más importante del motor suministrado por el fabricante BALDOR

Tabla 2. Datos de placa del motor BALDOR EM2555T-4 100HP, 1780RPM, 3F, 60Hz

CAT. NO.	EM2555T-4	P/N		ENCLOSURE	OPSB
SPEC.	44E192W048G1	CC	010A	FRAME	404T
HP	100	CLASS	F	HZ	60
VOLT	460	KVA-CODE	G	ODE BRG	6312
AMP	115	USABLE AT 208V		DE BRG	6316
RATING	40C AMB-CONT	GREASE	POPLYREX EM	ROTOR INERTIA	14.4 LF ²
NEMA-NOM-EFF	95.4	PF	85	SER.F.	1.15

Tabla 3. Datos de desempeño típico sin valores garantizados del motor BALDOR

Características generales							
Torque a plena carga;	295.0LB-FT	Configuración de arranque:		DOL			
Corriente sin carga:	41.5 Amps.	Torque de arranque:		843.0 LB-FT			
Res. Línea a línea @ 25°C.:	0.0465 Ohms A Ph / 0.0 Ohms B Ph	Torque de levantamiento:		409.0 LB-FT			
Incremento de temp. a carga nominal:	40 C	Torque de rot. Bloqueado:		500.0 LB-FT			
Incremento a temp. FS:	53 C	Corriente de arranque:		765.0 Amps.			
Característica de carga							
% DE CARGA NOMINAL	25	50	75	100	125	150	FS
Factor de potencia:	51.0	73.0	82.0	85.0	86.0	86.0	86.0
Eficiencia:	93.1	95.4	95.8	95.6	95.2	94.5	95.4
Velocidad:	1796.0	1791.0	1786.0	1781.0	1775.0	1769.0	1777.0
Amp. de líneas	49.4	67.7	89.5	115.2	143.0	172.6	131.9

Uno de los valores más importante que posee la tabla anterior es el valor de la corriente de arranque 765 Amperios, este valor determinará toda nuestra selección de elementos del tablero de protección y la coordinación de protecciones.

Existen dos normas venezolanas que obligan a cumplir con valores máximo y mínimos de tensión una de ellas es la norma **COVENIN 159-2005** donde se extrajo la siguiente tabla 4 y una norma más antigua **CADAFE 42-87** que se hace referencia con la tabla 5.

Tabla 4. Límites permisibles de la tensión de servicio del sistema en el punto de medición (**norma COVENIN 159-2005**)

Tensión nominal (V)	Zona A ¹		Zona B ²	
	Tensión mínima (V)	Tensión máxima (V)	Tensión mínima (V)	Tensión máxima (V)
120	114	126	108	132
240 Δ	228	252 \square	216 \square	264 \square
120/240	114/228	126 / 252	108 / 216	132 / 264
240/480	228/456	252 / 504	216 / 432	264 / 528
208 Y/120	198 Y/114	218 Y/ 126	187 Y/ 108	229 Y/ 132
480Y/277	456 Y/ 263	504 Y/ 291	432 Y/ 249	528 Y/ 305
480 Δ	456	504	432	528
600 Δ	570	630	540	660

1. Estos valores representan una variación admisible de 5% de la tensión nominal.
2. Estos valores representan una variación admisible de 10% de la tensión nominal.

Tabla 5. Límites permisibles de la tensión de servicio del sistema en el punto de medición (**norma CADAFE 42-87**)

TENSIÓN NOMINAL (Voltios)	TENSIÓN MÁXIMA (Voltios)	TENSIÓN MÍNIMA (Voltios)
120	126	114
240	252	228
120 / 240	126 / 252	114 / 228
208Y / 120	218Y / 126	197Y / 114
416Y / 240	436Y / 252	395Y / 228
480Y / 277	504Y / 291	456Y / 263

Basándose en ambas normas nuestro límite es de 480V \pm 5%, es decir, 504V como valor máximo y 456V como valor mínimo. Sumando a esto se tiene una máquina de 100 HP con su factor de servicio de 1.15 se hablaría de un máximo teórico 115 HP y cuya corriente típica de arranque es de 765 A. según tabla 3. Por todas estas características se hace necesario utilizar un arranque especial distinto al directo que garantice el nivel de tensión y conserve las partes mecánicas involucradas con el equipo de bombeo”.

3.1.1 Determinación del tiempo de arranque

Como se explicó en el apartado 2.2 existe una forma rápida de estimar el tiempo de arranque, el cual es fundamental saber para los ajustes de las protecciones que se verá a continuación.

La ecuación de cálculo rápido de tiempo de arranque es la siguiente:

$$t_a = 0,000010966 \frac{J \cdot n_N^2}{K \cdot P_N} \text{ [ec. 14]}$$

Donde:

J = Representa el momento de inercia

K = Es la relación que existente entre los pares de aceleración y el par nominal.

C_a = Potencia del motor en [kW]

n_N = Velocidad del motor en [r.p.m.]

Según los datos del fabricante Baldor en los anexos se tienen los siguientes datos:

C_a = Par aceleración medio = 409 Lb-Ft

C_N = Par nominal = 295 Lb-Ft

K = C_a/ C_N = 1,3864406

P_N = 100 Hp = 74.6 kW

J = 14.4 Lb-Ft² = 0,6068175912 Kg.m²

n_N = 1781 r.p.m

$$t := 0.000010966 \frac{0.6068175912 \cdot 1781^2}{1.3864406 \cdot 74.6} \text{ float,5} \rightarrow 0.20408 \text{ [ec. 14]}$$

Cabe destacar que este resultado es en segundo(s) y es arranque en vacío.

Este valor referencial ayudará a realizar la coordinación de protecciones.

3.1.2 Determinación de la curva de perfil de corriente del motor Baldor modelo EM2555T-4

Las características principales que intervienen en la selección de la protección de un motor eléctrico son:

- 1 El par que se debe vencer para dar movimiento (par de oposición)
- 2 El tiempo que desarrolla para alcanzar su velocidad nominal

Los aspectos que se consideran importantes para la selección de las características de protección para motores eléctricos, se obtiene de la llamada curva del perfil de corrientes para motor eléctrico, donde se ubica lo siguiente:

1. Corriente a plena carga
2. Corriente de magnetización
3. Corriente a rotor bloqueado
4. Tiempo de aceleración
5. Tiempo de atascamiento

La corriente nominal de motor Baldor:

$$I_n = 115 \text{ A}$$

La corriente del rotor bloqueado

$$I_{rb} = kI_n \text{ [ec. 15]}$$

k factor que corresponde a la letra de código (KVA-CODE) en nuestro caso es la G

Tabla 6 Designación de KVA-CODE por letra Norma Nema –Mg1

Letter Designation	KVA per Horsepower *	Letter Designation	KVA per Horsepower *
A	0 - 3.15	K	8.0 - 9.0
B	3.15 - 3.55	L	9.0 - 10.0
C	3.55 - 4.0	M	10.0 - 11.2
D	4.0 - 4.5	N	11.2 - 12.5
E	4.5 - 5.0	P	12.5 - 14.0
F	5.0 - 5.6	R	14.0 - 16.0
G	5.6 - 6.3	S	16.0 - 18.0
H	6.3 - 7.1	T	18.0 - 20.0
J	7.1 - 8.0	U	20.0 - 22.4
		V	22.4 and up

$G = 5.6 - 6.3 \text{ KVA/HP}$

$I_{rb} = kI_n = 6.3 \times 115 = 724,5 \text{ A}$ [ec. 16] (tomo el factor de letra más alto) tiempo de 0.1 s a 4 s.

La corriente de magnetización (se toma 1,5 veces el valor de I_{rb} por ser de bajo voltaje)
 $I_M = 1,5 \times I_{rb} = 1,5 \times 724,5 = 1086.75 \text{ A}$ [ec. 17], tiempo de 0 a 0.1.

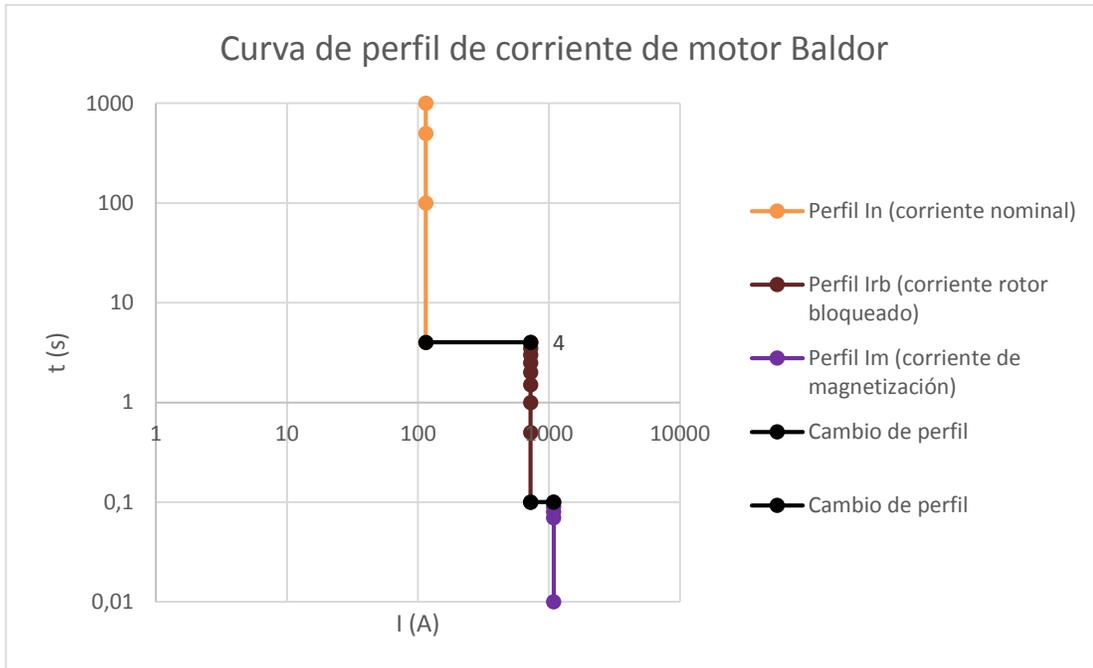


Figura 15 Curva perfil de corriente de motor Baldor modelo EM2555T-4

3.1.3 Determinación de la corriente de corto circuito del motor Baldor modelo EM2555T-4

Apoyado bajo la norma IEEE STD 141-1993 (Red Book) se tiene:

$$S_{Base} = \frac{746 \times Hp}{Fp \times \sqrt{3} \times ef} \text{ [ec. 18]}$$

Donde:

S_{base} = Potencia base del sistema

H_p = Valor de potencia de placa del motor 100 HP

F_p = Valor de factor de potencia del motor 0.85

Ef= eficiencia para motores menores a 25 Hp es 0.7 y para motores mayores 25 Hp 0.8

Evaluando queda:

$$S_{Base} = \frac{746 \times 100}{0.85 \times \sqrt{3} \times 0.8} = 63.33 \text{ KVA [ec. 19]}$$

$$I_{Base} = \frac{S_{Base}}{\sqrt{3} \times V_{base}} = \frac{63.33K}{\sqrt{3} \times 480} = 76.18 \text{ A [ec. 20]}$$

I_{Base} = Corriente base del Sistema

V_{Base} = Voltaje base del Sistema

$$I_{cc(0/1)} = \frac{V_{th(0/1)}}{Z_{cc(0/1)}} = \frac{1}{0.28} = 3.57 \text{ [ec. 21]}$$

Donde:

$I_{cc(0/1)}$ = corriente de cortocircuito por unidad

$V_{th(0/1)}$ = es el voltaje de Thevenin por unidad

$Z_{cc(0/4)}$ = es valor de Z_{cc} equivalente ver tabla 7

Por lo tanto

$$I_{cc \text{ sim}} = I_{Base} \times I_{cc(0/1)} \text{ [ec. 22]}$$

$$I_{cc \text{ sim}} = 76.18 \times 3.57 = 271.91 \text{ A}$$

Tabla 7 Multiplicadores de reactancias (o impedancias) de máquinas rotativas para la combinación de red [11]

TIPO DE MÁQUINA ROTATORIA	RED DE PRIMER CICLO	RED INTERRUPTIVA
Motores de Inducción : Todo el resto, de 50 HP y arriba.	1.2 X*d*	3.0 X*d*
Todos los motores pequeños menores de 50 HP.	1.67 X*d**	Ignorada

- * O estimar la red de primer ciclo $X = 0.20$ pu, basado en la capacidad del motor.
- * O estimar la red interruptiva $X = 0.50$ pu, basado en la capacidad del motor.
- ** O estimar la red de primer ciclo $X = 0.28$ pu, basado en la capacidad del motor.

$$I_{cc\ asim} = \left(\sqrt{1 + 2e^{\frac{-4\pi(t)}{X/R}}} \right) \times I_{cc\ sim} \text{ [ec. 23]}$$

Donde:

$I_{cc\ asim}$ = Corriente de cortocircuito asimétrica

t= tiempo en ciclos

X/R= relación entre la reactancia y la resistencia ver gráfico 16

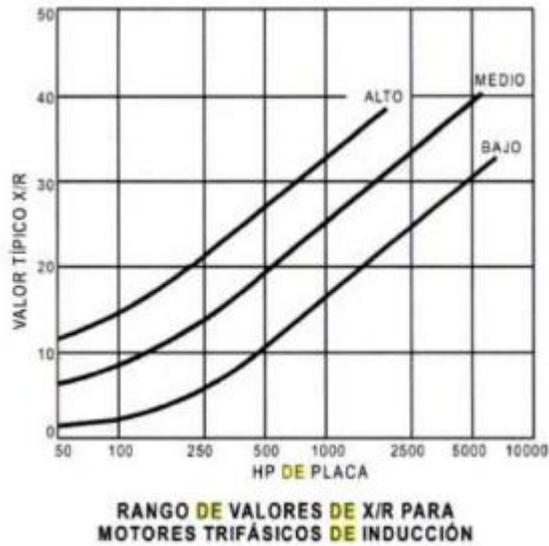


Figura 16 Rango de valores de x/r para motores trifásicos de inducción

$I_{cc\ sim}$ = corriente de cortocircuito simétrica

Evaluando queda

Tomando la relación x/r de la grafica 16 en la curva media x/r es 9

$$I_{cc\ asim} = \left(\sqrt{1 + 2e^{\frac{-4\pi(t)}{X/R}}} \right) \times I_{cc\ sim} \text{ [ec. 24]}$$

$$I_{cc\ asim} = \left(\sqrt{1 + 2e^{\frac{-4\pi(1)}{9}}} \right) \times 271.91 = 332.46 \text{ A}$$

Mediante este último valor se tiene el nivel mínimo que debe tener que soportar los conductores sin que reporten daño y dimensionar el interruptor para que tenga la capacidad de despeje a este nivel corriente sin que sufra desperfecto por ello.

3.1.4 Determinación de Nivel de corto circuito mediante simulación de ETAP 12

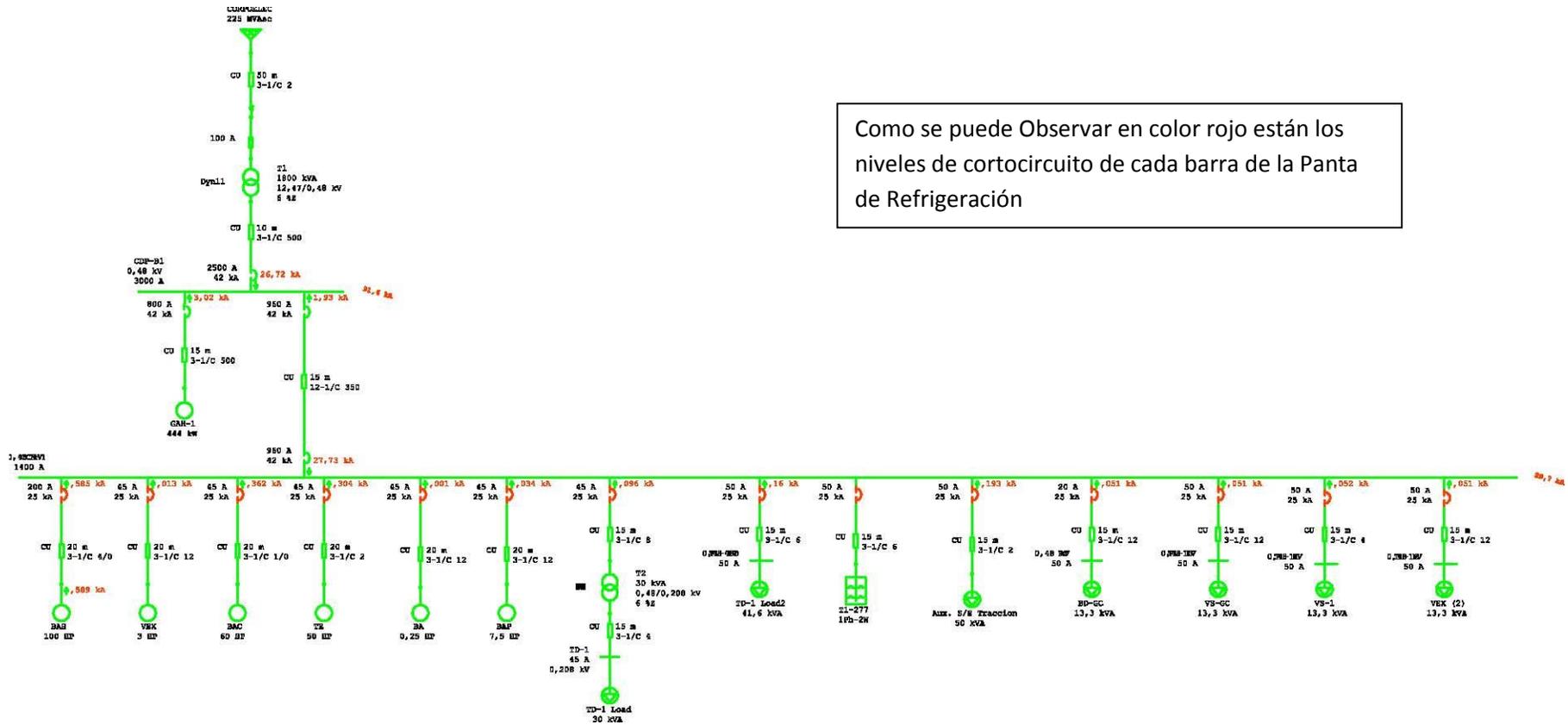


Figura 17 Simulación en Etap de los niveles de cortocircuito.

3.1.5 Determinación de curva de daño térmico del motor Baldor en forma teórica

“Curva de daño térmico Esta curva representa tres curvas distintas, las cuales siempre se dibujan como si fueran una curva general. Estos límites térmicos son zonas relativamente indeterminadas, las cuales son mencionadas a continuación:

- La porción de la corriente más alta indica el número permisible de veces la corriente de rotor bloqueado.

Este es el tiempo en que el motor puede permanecer en reposo después que el motor ha sido energizado, antes de que ocurra el daño térmico en las barras del rotor y los anillos conectores ó incluso en el estator.

- La curva de límite térmico de aceleración de la corriente de rotor bloqueado a la corriente de par de arranque del motor, es alrededor del 75% de la velocidad del motor.

- La curva de límite térmico de operación representa la capacidad de sobrecarga del motor, esto durante la operación de emergencia.

Debido a que estos parámetros solamente son obtenidos por medio del fabricante, se diseña una curva de límite aproximada por medio de dos puntos, los cuales son mostrados en la Tabla 8.” [13]

Tabla 8 Curva térmica de motores eléctricos [13]

Corriente (Amp.)	Tiempo (Seg.)
$3 * I_N$	50
$7.57 * I_N$	8

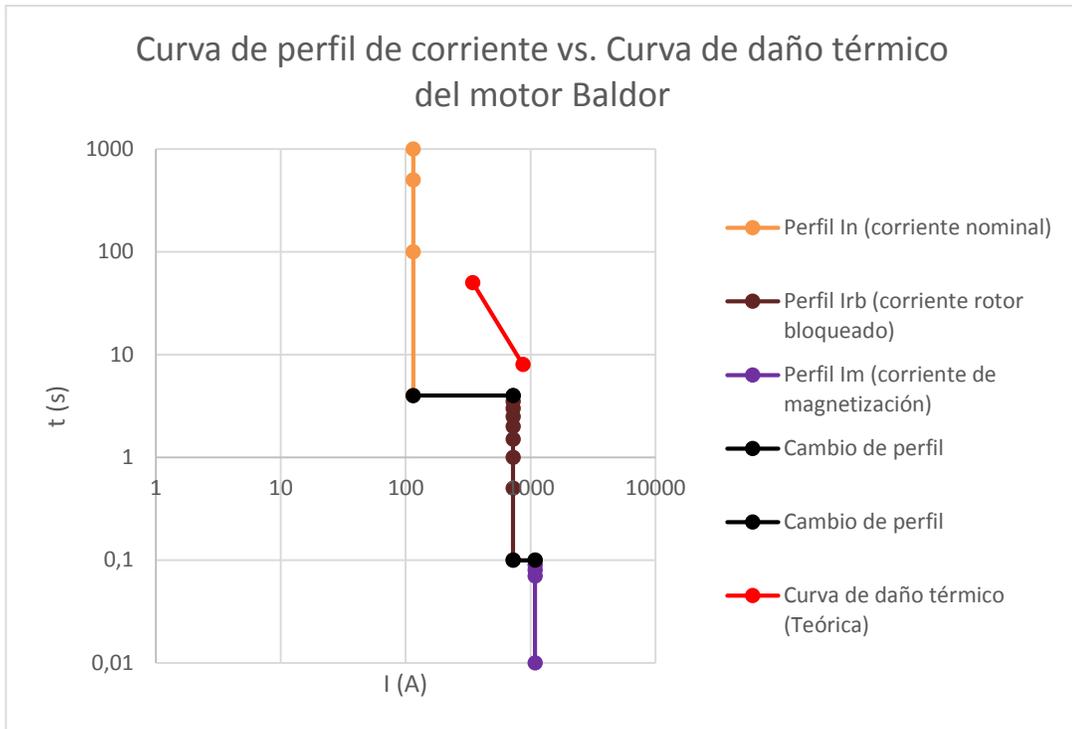


Figura 18 Curva de perfil de corriente vs. Curva de daño térmico del motor Baldor

3.2 Determinación del cableado de potencia

Si se parte de una corriente nominal típica de 115 A por fase y una potencia trifásica de 95 KVA @ 480V (condiciones de instalación del motor Baldor) y distancia máxima de 50 m se procedió al cálculo:

$$S = \frac{(0.746 \times P)}{fp \times n} \text{ [ec. 25]}$$

Donde:

S= Potencia eléctrica adsorbida por la carga, en KVA

P= Potencia mecánica de la carga, en HP

fp= factor de potencia de la carga

n= Rendimiento mecánico

$$S = \frac{(0.746 \times 100)}{0.85 \times 0.954} = 91.996 \text{ KVA [ec. 26]}$$

También existe otra forma de representar esta potencia

$$S = \sqrt{3} \times (V_L \times I_L) = 1.732 \times 0.480 \times 115 = 95.60 \text{ KVA [ec. 27]}$$

S= Potencia aparente adsorbida por la carga, en KVA

V_L = Voltaje de línea de la carga, en kV

I_L = Corriente de línea, en A

Dado que este número es mayor pues no toma eficiencia ni factor de potencia se tomará como valor base para el cálculo de conductores para agregar un mayor nivel de seguridad.

Donde:

$\text{Cos}(\phi) = 0.85$ (Dato de placa del motor)

Voltaje del sistema = 480 V trifásico a 60hz

Corriente a plena carga:

$$I_L = \frac{95.60}{\sqrt{3} \times 0.48} = 114.99 \text{ A [ec.28]}$$

Lo cual corresponde con la corriente a plena carga del motor Baldor

El cálculo de la corriente derrateada (I_d) dependerá de los siguientes factores de corrección:

- Factores de ajuste por cantidad de conductores por tubería (N_c) usa la tabla 310.15 del Código eléctrico nacional 2004 (p. 128)
Factor= 80% pues se selecciona de 4 a 6 conductores= 0.80
Régimen de temperatura del conductor se elije 90 °C
- Factor de corrección de temperatura (F_t) por la tabla 310.16 CEN 2004 (p.130)= 0.87
- Factor de carga del conductor (F_c): 80%= 0.80

$$I_d = \frac{I_L}{N_c \times F_t \times F_c} = \frac{114.99}{0.80 \times 0.87 \times 0.80} = 206.52 \text{ A [ec.29]}$$

Cálculo por caída de tensión:

Basándose en el CEN -2004 Tabla 8 propiedades de los conductores (p.704) se busca el valor de la resistencia del conductor recubierto de cobre AWG 3/0 es 0.2610 Ω/Km @ 75 °C.

En este caso se debe recurrir a la fórmula de corrección de temperatura para ajustar el valor de resistencia:

$$R_2 = R_1 \times (1 + \alpha \times (T_2 - T_1)) \text{ [ec. 30]}$$

Donde:

R_2 = Resistencia del conductor corrida a la nueva temperatura, en Ω/m

R_1 = Resistencia del conductor a 75°C, en Ω/m

α = 0.00323 para el cobre y 0.00330 para el aluminio ambos a 75°C

T_2 = Temperatura en °C en condiciones de diseño, en nuestro caso 90°C

T_1 = Temperatura en °C de 75°C

$$R_2 = (2.06091E - 4) \times (1 + 0.00393 \times (90 - 75)) = 2.7356E-04 \Omega/m \text{ [ec. 31]}$$

Para el conductor AWG 3/0 a las mismas condiciones de operación descritas será $X_L = 1.7105E-4 \Omega/m$

% Caída de tensión será dada por:

$$\% \text{Caída de tensión} = \frac{KVAm}{N_c} \times \left(R_2 \times Fp + \frac{X_L \times \text{Sen}(\text{Ac}os(Fp))}{V_n \times 10 \times 0.208^2} \right) \text{ [ec. 32]}$$

$$V_n = \left(\frac{0.480}{0.208} \right)^2 = 5.325 \text{ ec. 21}$$

$$\% \text{Caída de tensión} = \frac{4780}{1} \times \left(2.7356E - 4 \times 0.85 + \frac{1.7105E - 4 \times \text{Sen}(\text{Ac}os(0.85))}{5,325 \times 10 \times 0.208^2} \right) = 0,67 \text{ [ec. 33]}$$

Donde:

KVAm= Es el valor de la potencia aparente multiplicada por la cantidad de metros de conductor que serán 50 m.

N_c = número de conductores por fases

R_2 = resistencia a temperatura de operación calculada previamente.

Fp= factor de potencia de operación 0.85

V_n = Factor de nivel de tensión

X_L = Reactancia del conductor en Ω/m

DATOS DEL SISTEMA	
Sistema:	480 VCA, 3F, 4H, 60 HZ
Nivel de Tensión (KV):	0,480
Carga (KVA)	95,60
cos ϕ:	0,85
KVAm=	4780,00
Corriente a plena carga (Amp):	114,99

CALCULO POR CAPACIDAD DE CORRIENTE	
Factor de Carga del Conductor:	80%
Temperatura Ambiente (°C):	41- 45
Corriente Derrateada (Amp):	206,52
Conductor Escogido:	# 3/0

CALCULO POR CAIDA DE TENSION	
Calibre del Conductor:	# 3/0
Resistencia (Ohm/m):	2,7356E-04
Reactancia (Ohm/m):	1,3816E-04
Caída de Tensión (%):	0,63

Tabla 9. Resumen de cálculos de los conductores

El cable escogido es 3/0 THHW 90°C de material cobre cumple con los valores de tensión y corriente según cálculos.

Para mayores detalles de cómo se realizó el cálculo ir al anexo 1A al anexo 1B.

3.2.1 Cálculo de la curva de daño de un conductor

“Para el trazo de la curva de daño se emplea generalmente las curvas proporcionadas por los fabricantes pero en el caso que no se conozcan, se aplican las ecuaciones 33 y 34, se aplican las ecuaciones respectivamente:

Para el cobre:

$$\left(\frac{I}{CM}\right)^2 (t)Fac = 0,0297 \log_{10} \left[\frac{(tf)+234,5}{t_0+234,5} \right] \text{ [ec. 33]}$$

Para el aluminio:

$$\left(\frac{I}{CM}\right)^2 (t)Fac = 0,0125 \log_{10} \left[\frac{(tf)+228,1}{t_0+228,1} \right] \text{ [ec. 34]}$$

Donde:

I=Corriente que circula por el conductor en A.

CM=Calibre del conductor.

t= Tiempo en que circula la corriente, en s.

t₀= Temperatura inicial antes del cambio de corriente, en °C.

t_f= Temperatura final después del cambio de corriente, en °C.

Fac= relación de efecto de piel o relación de corriente alterna a corriente directa.”[11]

“A continuación trazamos la curva de daño de un conductor de cobre 3/0 AWG (85 mm²) en con papel en escala logarítmica, en este caso el conductor tiene una ampacidad de 355 A, su temperatura es de 90 °C, la temperatura final límite de asilamiento es de 150 °C, el factor de efecto de piel es de 1,10.”[11]

$$85mm^2 \left(\frac{1pulg}{25,4mm}\right)^2 \left(\frac{1CM}{\frac{\pi}{4}10^{-6}pulg^2}\right) = 167749,6456 CM \text{ [ec. 35]}$$

Despejando la corriente que circula por el conductor de la ecuación ## queda:

$$I = \left(\sqrt{(0,0297 \log_{10} \left(\frac{tf+234,5}{t_0+234,5} \right))} / (0,1 \times 1,10) \right) CM \text{ [ec. 36]}$$

Para trazar la curva de daño del conductor 3/0 se considera los tiempos de referencia. t₀= 0,1 s, t_f= 10 s

$$I_{0,1} = (\sqrt{(0.0297 \log_{10} \left(\frac{150^{\circ}C + 234,5^{\circ}C}{90^{\circ}C + 234,5^{\circ}C} \right))}) / (0,1 \times 1,10)) 167749,6456 = 23660,45784 \text{ A [ec.36]}$$

$$I_{10} = (\sqrt{(0.0297 \log_{10} \left(\frac{150^{\circ}C + 234,5^{\circ}C}{90^{\circ}C + 234,5^{\circ}C} \right))}) / (10 \times 1,10)) 167749,6456 = 2366,045784 \text{ A [ec.37]}$$

3.2.2 Selección de protección de conductores eléctricos

“La protección de los conductores 3/0 AWG se realiza trazando la curva de daño del conductor y la curva de su ampacidad en hojas logarítmicas, la ampacidad del conductor se toma de la norma NOM-001-SEDE-2005.” [11]

“La protección con fusibles se realiza al 300% de la corriente de su ampacidad por lo que la protección debe ser siempre este porcentaje, si llegara a pasar este porcentaje la protección del conductor con fusibles estaría sobrada.”[11]

$I_{fus}=355 \times 3=1065 \text{ A [ec. 38]}$ (Para el conductor de cobre 3/0 AWG)

“Para elegir la curva de fusible que permita proteger correctamente a los conductores de cobre 3/0 se usa una de las curvas que se encuentran dentro de los límites de la corriente ampacidad y la curva del daño eléctrico del conductor. La curva del fusible que se escoge para proteger al conductor 3/0 la que se encuentra enseguida de la curva de la corriente del fusible.”[11]

Para el conductor de cobre 3/0 AWG se usará el fusible de 160 A, ya que opera de a 650 A. En la tabla 10 se muestra la selección de la cura del fusible ideal para postergar el conductor 3/0 como los intervalos en que varía las curva del fusible para proteger al conductor.

Tabla 10 Selección de fusible para los conductores.

Número de curva	Calibre [AWG]	Ampacidad [A]	I_{Fusible} [A]	Fusible limitador de corriente
				Ideal [A]
2	3/0	355	1065	160

En la figura 19 se observa la selección de los fusibles para proteger a al conductor de cobre 3/0 este es 250 E.

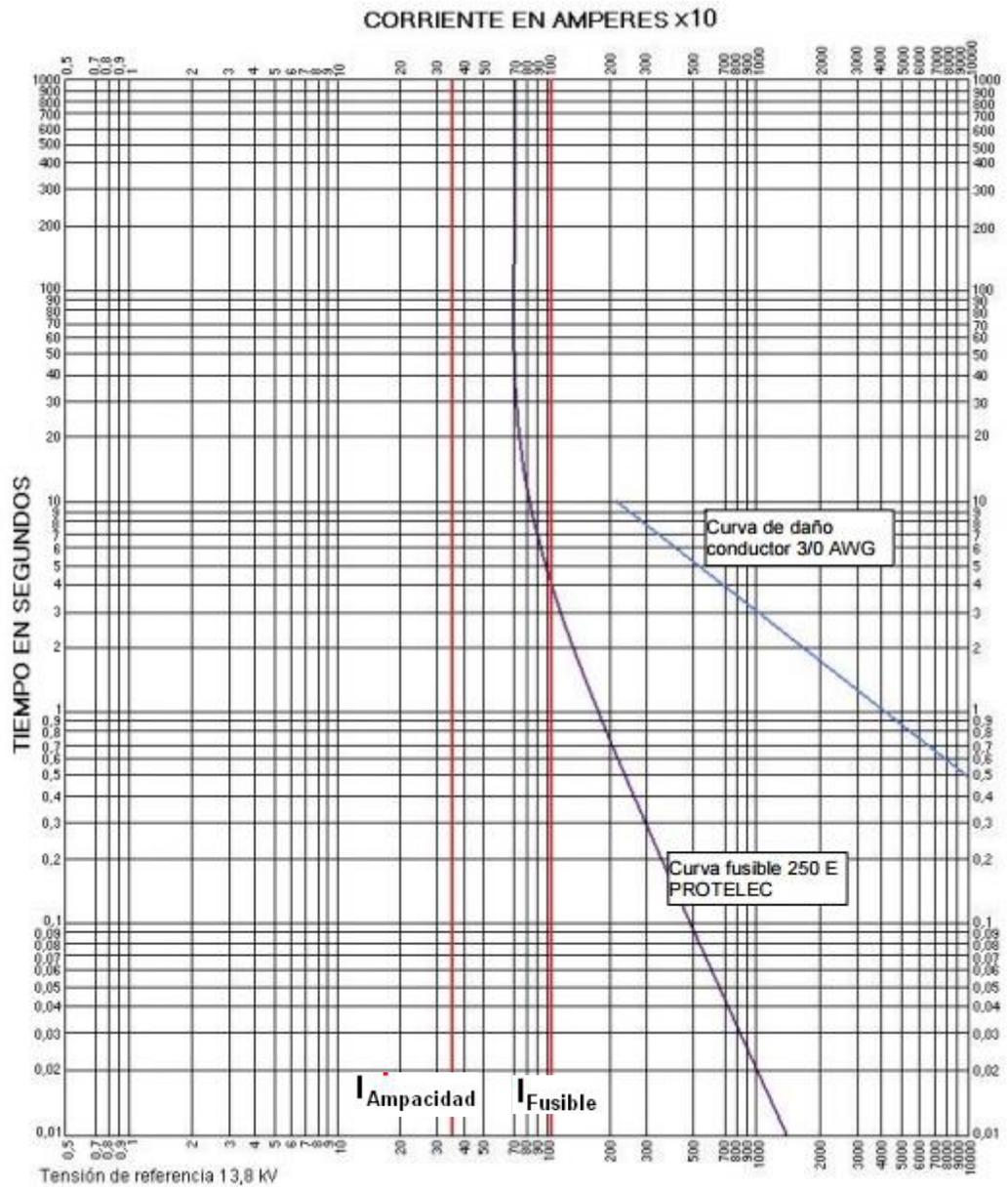


Figura 19 Protección de un conductor de cobre 3/0 por medio de un fusible [11]

3.3 DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES DEL TABLERO

Se debe recordar que existe un factor que determina nuestras condiciones iniciales de cálculo:

- a. Los motores de las bombas ya fueron seleccionados y están en funcionamiento, por lo tanto los niveles de potencia, corriente de arranque y factor de potencia están determinados por los datos de dicho motor.

3.3.1 Determinación del arrancador suave

Dado nuestro caso particular las siguientes condiciones serán fundamentales para escoger nuestro arrancador suave:

1. Corriente nominal: 115 A
2. Número de maniobras (pocas veces al día como máximo 4)
3. Aplicación: sistema de bombeo de agua

Siendo la más importante de la esta características la corriente nominal que emplea el motor Baldor de 115 A y le nivel de potencia a régimen permanente de 100 Hp.

El arrancador suave escogido que cumple las condiciones antes mencionadas es:

El arrancador suave de una “Marca A” conocida el cual tiene las siguientes características básicas: 130A de corriente nominal, conexión trifásica, tensión de funcionamiento 220 Vac a 575 Vac. El criterio de selección más importante para caracterizar el arrancador suave, en nuestro caso es la corriente de trabajo que corresponde al motor Baldor de 115 A, la altura sobre el nivel del mar que sería otro factor que afecta la electrónica no se toma en cuenta pues el lugar de implementación no será superior a 1000 metros sobre el nivel del mar.

También he de hacer mención que la empresa Baldor recomienda el siguiente tipo de arrancador suave (de acuerdo a las características del motor en funcionamiento):



MST-175-CA
SFTSTRT 175A 208-575V 60, 125, 150HP OPEN

List Price	3,881.00 USD
Multiplier Symbol	E7
Ship Weight	44 LB
UPC	781568673041

SPECS DRAWINGS

AMPS IEC	175.00 A	Height	16.5400 in
AMPS UL Class 10	156.00 A	High Current Protection	YES
Enclosure	OPEN UL TYPE 0 IP20	Locked Rotor Protection	YES
Frame	C	Maximum Altitude	3,300 ft
Heavy Duty, HP, 460V	100.00 hp	Normal Duty, HP, 208V	50.00 hp
Rated Operational Voltage	575 V	Normal Duty, HP, 230V	60.00 hp
Brand	ABB	Normal Duty, HP, 460V	125.00 hp
Ambient Temperature	40 °C	Normal Duty, HP, 575V	150.00 hp
AMPS UL Class 30	130.00 A	Phase Imbalance Protection	Yes
Depth	10.6300 in	Phase Reversal Protection	YES
Dual Overload Protection	YES	Programmable Inputs	2
Electronic Overload Protection	YES	PTC Connection Protection	YES
Heavy Duty, HP, 208V	40.00 hp	Rated Insulation	690 V
Heavy Duty, HP, 230V	50.00 hp	Underload Protection	YES
Heavy Duty, HP, 575V	125.00 hp	Width	14.1700 in

Figura 20 Muestra de catálogo online de un arrancador suave marca ABB recomendado por Baldor (julio 2016) [10].

Estos dos ejemplos de arrancadores son con fines didácticos a manera de selección, quedará de parte de Metro la adquisición del mismo mediante licitaciones.

3.3.2 Determinación de fusibles ultra rápidos

Una vez seleccionado el arrancador suave se determinará el fusible ultra rápido correspondiente a la parte de potencia que protegerá el SSW06 (Marca A).

Condiciones de operación:

Arrancador suave de Marca A

Tensión nominal 480V ac. en Y.

Corriente de nominal 115 A

Corriente de arranque 765 A

Tiempo de aceleración: 30 seg. Max.

Corriente Nominal del Fusible:

La corriente nominal del fusible en régimen constante debe ser dimensionada según la ecuación de abajo:

Corriente nominal de la carga = IRMS de la carga = 115A

La corriente nominal del fusible debe ser como mínimo 20% que la corriente nominal de la carga, por eso la constante A_1 es 0.8

$$\text{Así: } I_n = \frac{I_{RMS\text{de la carga}}}{A_1} = \frac{115}{0.8} = 143.5 \text{ A [ec. 25]}$$

Si se considera el régimen de carga constante, debería ser utilizado un fusible WEG tamaño 00 160 A, con I^2t de 15270 A²s y factor de reducción $0.90 \times I_n$ y $0.75 \times I_n$ cuando esta ensamblado en base individual y seccionadora respectivamente.

Pero de cualquier forma esta selección por está parámetro es insuficiente pues el fusible actuaría indebidamente porque ocurren sobrecarga de 765 amperios con el motor en arranque un periodo de 0,20 segundos.

Análisis de la Sobrecarga cíclica

Para evitar que el fusible aR WEG Actúe de forma indebida durante la corriente cíclica del arranque de la carga. Según la tabla 11 se usa un factor de corrección 2.5 para la corriente de sobrecarga en nuestro caso es 1912 A (765×2.5) a ese valor de corriente debe fundirse el fusible según la gráfica 15 a los 30 segundos en FNH2 aR de 710 A. En este caso la máxima corriente en régimen continuo que soportara este fusible es de factor de reducción $0.70 \times I_n$ (497 A) y $0.55 \times I_n$ (390.5 A) cuando esta ensamblado en base individual y seccionadora respectivamente ver tabla 11.

Tabla 11 Múltiplos de la corriente de fusión del fusible aR WEG es mayor que la corriente de sobrecarga para el mismo tiempo de duración de la misma

Tipo de conexión del fusible aR	Modelo	Múltiplos que la corriente de fusión del fusible aR WEG debe ser mayor que la corriente de sobrecarga para lo mismo tiempo de duración de la misma.
Contacto cuchilla	FNH00	2,0
	FNH1	2,5
	FNH2	
	FNH3	
Flush end	FNH3FEM	2,0 ¹⁾
	FNH23FEA	

Fusibles FNH2 aR

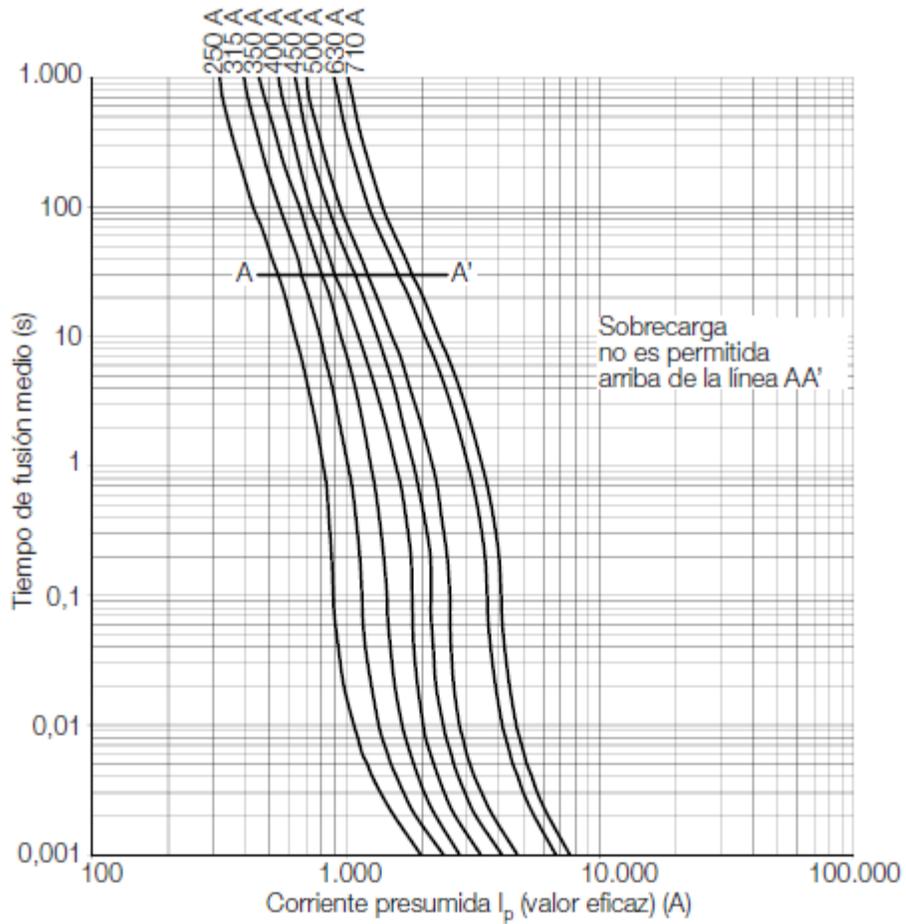


Figura 21 Tiempo de fusión del fusible vs Corriente presumida en FUSIBLES FNH2 aR

I^2t del Fusible:

Este fusible posee el $I^2t = 378450$ (ver tabla 11) en 690 V. Como la alimentación de potencia es en conexión estrella Y, la tensión en el fusible es la tensión de fase y no la tensión de línea. El cálculo de la tensión de fusible es la siguiente:

$$V_f = \frac{V}{\sqrt{3}} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277.12 \text{ V [ec.28]}$$

Por medio de la Figura 16 es posible evaluar que el I^2t del FNH2 710A aR WEG es reducido con un factor de 48% del valor a 480V, resultando 181656 A²s (0.48 x 378450)

	Características técnicas					
	Referencia	Turnado	Corriente (A)	I ² de pre-arco (durante ts) ¹⁾	I ² total de arco (durante ts+tt) ¹⁾	Potencia disipada (W) 0.8 _u
	FNH00-20K-A	00	20	16	240	3,2
	FNH00-25K-A		25	19	255	3,5
	FNH00-35K-A		35	23	490	5
	FNH00-40K-A		40	56	580	7
	FNH00-50K-A		50	130	1.430	9
	FNH00-63K-A		63	180	2.170	10,5
	FNH00-80K-A		80	270	2.710	13,5
	FNH00-100K-A		100	400	4.530	14
	FNH00-125K-A		125	810	6.350	16,5
	FNH00-160K-A		160	2.100	15.270	22,5
	FNH00-200K-A		200	2.900	25.670	26,5
FNH00-250K-A	250	6.200	43.980	30,5		
	FNH1-63K-A	1	63	63	770	15
	FNH1-80K-A		80	175	1.610	19
	FNH1-100K-A		100	320	3.050	21
	FNH1-125K-A		125	695	6.360	25
	FNH1-160K-A		160	1.480	13.090	29,5
	FNH1-200K-A		200	2.420	16.380	34,5
	FNH1-250K-A		250	4.920	29.810	40,5
	FNH1-315K-A		315	7.310	39.590	46
	FNH1-350K-A		350	11.430	64.670	52
	FNH1-400K-A		400	16.950	96.860	59
	FNH2-250K-A	2	250	3.390	24.370	45,5
	FNH2-315K-A		315	4.780	32.780	57,5
	FNH2-350K-A		350	7.990	60.150	66,5
	FNH2-400K-A		400	14.650	92.060	77
	FNH2-450K-A		450	16.420	132.960	91
	FNH2-500K-A		500	23.040	146.250	103
	FNH2-630K-A		630	49.130	296.620	127
	FNH2-710K-A		710	57.910	378.450	137,5

Tabla 12 Características técnicas que hace referencia a I^2t por modelo de fusible aR WEG

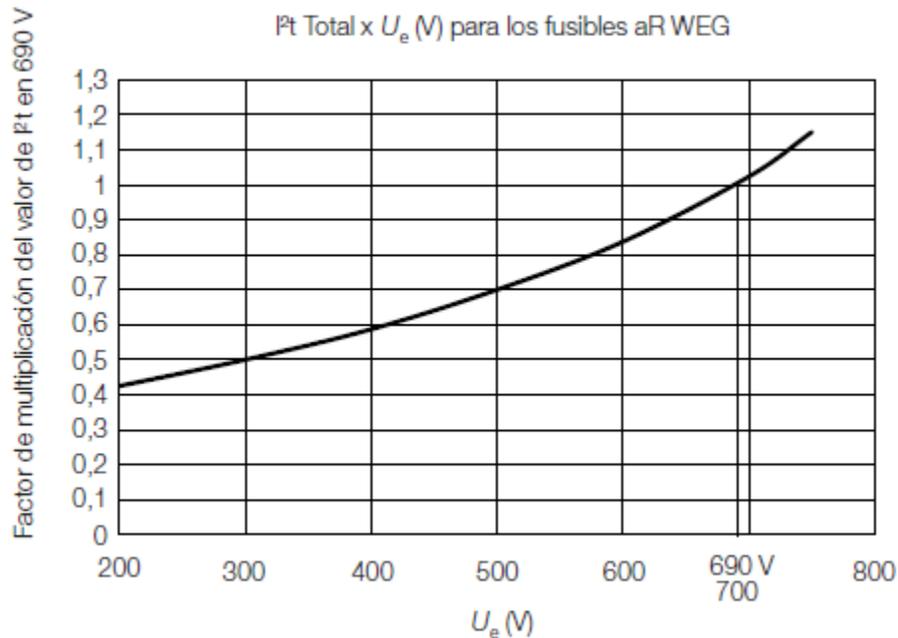


Figura 22 Variación de I^2t Total x Tensión de trabajo

Nota: se usó en este caso (solo para fines didácticos) un ejemplo de Fusible ultra rápidos marca WEG a manera de ejemplo ya en sus manuales explica paso a paso como calcular estos elementos de protección en español, inglés y portugués.

3.3.3 Determinación del contactor

Los contactores se emplean para el mando local o a distancia de cualquier tipo de máquinas eléctricas; se utilizan en los sistemas de mando en que la potencia de acoplamiento y la frecuencia de las maniobras son muy exigentes. Además resulta indispensable en la automatización para el mando de las secuencias de trabajo; están clasificados según el tipo de carga y la corriente que desconectan y conectan. En la tabla 2 se muestra la clasificación por categorías de trabajo.

Como se trata de un motor para equipo de bombeo es suficiente que el rotor sea de jaula de ardilla, ya que se dispone de un par de arranque lo suficientemente elevado y un mantenimiento muy bajo. En aplicaciones parecidas a la del caso en estudio se arrancará la unidad con seis veces la corriente nominal (765A) y se parará justamente cuando la corriente alcance el valor nominal, siendo ésta forma de trabajo idealizada para el contactor. Esto se ubica en la categoría de trabajo AC-3 de la tabla 2 como se verá más adelante, con cuatro millones de operaciones de vida útil.

De todas maneras siempre ocurren paradas inesperadas, en pequeño porcentaje, claro está, que en algunos arranques el motor, antes de alcanzar la velocidad nominal, es obligado a apagarse. Esto no es deseable, pero en la práctica ocurre, y el motor una vez arrancado es apagado inmediatamente cortando la corriente de arranque. Esto obliga colocar una parte del trabajo del contactor como AC-4, considerando que en toda su vida útil la contribución puede llegar a ser de un 10%.

Como el consumo del motor es de 115 A para la carga nominal, el contactor lo se puede determinar con capacidad mayor o igual a esa corriente. Se tomó como referencia uno de tantos fabricantes en el mundo con representación en Venezuela, por ejemplo Marca A. Se selecciona el contactor con capacidad igual o inmediatamente superior a 115A, el CWM150-22-30-E10 junto con el relé de sobrecarga recomendado por la empresa RW317-1D.

3.3.4 Determinación del relé de protección térmica

Los relés térmicos son aptos para proteger el motor contra pequeñas sobrecargas de cierta duración, como las producidas por encima de la corriente nominal y por debajo de la corriente del rotor bloqueado. Ejemplo de ello se encuentra cuando se ha excedido el desgaste de rodamiento, lo que exige un ligero, pero peligroso aumento de la corriente por encima de la nominal por un tiempo prolongado.

El relé de protección térmica se elige del mismo fabricante Marca A para la capacidad de carga completa de 115 A. La gráfica de la figura 23 muestra la curva de disparo del relé térmico modelo RW317-1D, es inversamente proporcional a la corriente que por él circula. Tiene un rango ajustable que va de 100A hasta los 215A, compensado contra las variaciones de la temperatura ambiente y sensitiva a la pérdida de fase, se ajusta a la corriente full carga. Otros detalles, ver anexos 5 y 6.

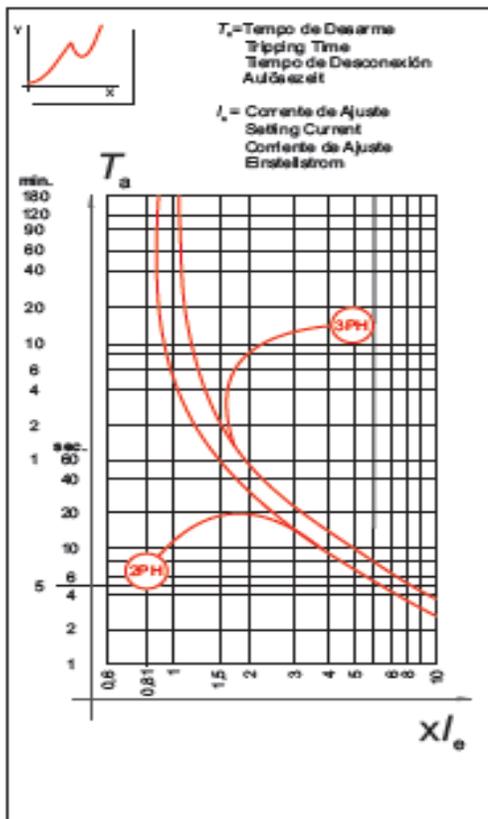


Figura 23 Curva del relé de protección térmica de la serie RW317-1D, Marca A con rango de ajuste de 100 – 215 A.

3.3.5 El breaker o interruptor automático

En nuestro caso los motores son de 100 hp en 480V con una corriente nominal de 115 A y como se desprende de la figura 5 su corriente de rotor bloqueado es 724.5 A ver Ec.16. Esta es la corriente que consumirá el motor cada vez que arranque y el breaker no debe dispararse en ese caso. Como en la mayoría de los casos se supondrá,

que los fabricantes de bombas no suministran las curvas de Par vs Corriente para su cálculo, y que el tiempo de arranque con carga, tomando el caso práctico en el sitio, es aproximadamente 3 segundos sin tomar en cuenta el uso de un arrancador suave.

Dado que la tensión está en el nivel de tensión baja se utilizará un interruptor termo magnético y para su ajuste se toma el 150% de ajuste de la corriente nominal del motor. Por lo tanto la protección es:

$$115 \times 1,5 = 172,5 A \text{ [ec. 39]}$$

Su valor comercial es de 150 A “Marca C” y la curva de interruptor termomagnético se muestra en la figura 23.

El interruptor “Marca C” está diseñado para las protecciones de motores con base al principio magnético; tiene un ajuste que permite seleccionar la curva de disparo, permitiendo así adaptarse a las necesidades de cada instalación. Está provisto de sensores de corriente en cada polo, garantizando, de esta manera, una efectiva protección contra cortocircuitos.

De todas las unidades de disparo disponible para este interruptor: 3, 7, 30, 60, 100 y 150 amperios, la que mejor se adaptó a nuestras condiciones de trabajo fue la de 150A. Ya que colocando el ajuste en la posición 6 se fija la curva de disparo instantáneo para 1528A, la cual presentará el disparo entre un valor mínimo de 1105 A; ambos por encima de la corriente de rotor bloqueado: 724.5 A basado en la Ec.16. La figura 24 muestra la gráfica del interruptor con todas sus opciones.

Con el fin de representar en una misma gráfica las diferentes curvas involucradas en el análisis, se va a recopilar toda la información normalizándola en una misma escala, facilitando de esta manera la representación. En la tabla 12 se muestran los valores de corriente y tiempo tomados del modelo representado en la figura 5; en la tabla 13, los valores de corriente del relé térmico como una función de tiempo expresado en segundos; y la tabla 14, la corriente de cada unidad electrónica para el interruptor Mag-Breaker y el disparo instantáneo según la posición de ajuste

seleccionado. En este caso téngase en cuenta que solo está disponible unidades electrónicas (rating plug) que coincide con la capacidad de la caja (frame).

Tabla 13. Valores de corriente y tiempo calculados de la curva de corriente que se muestra en la figura 5.

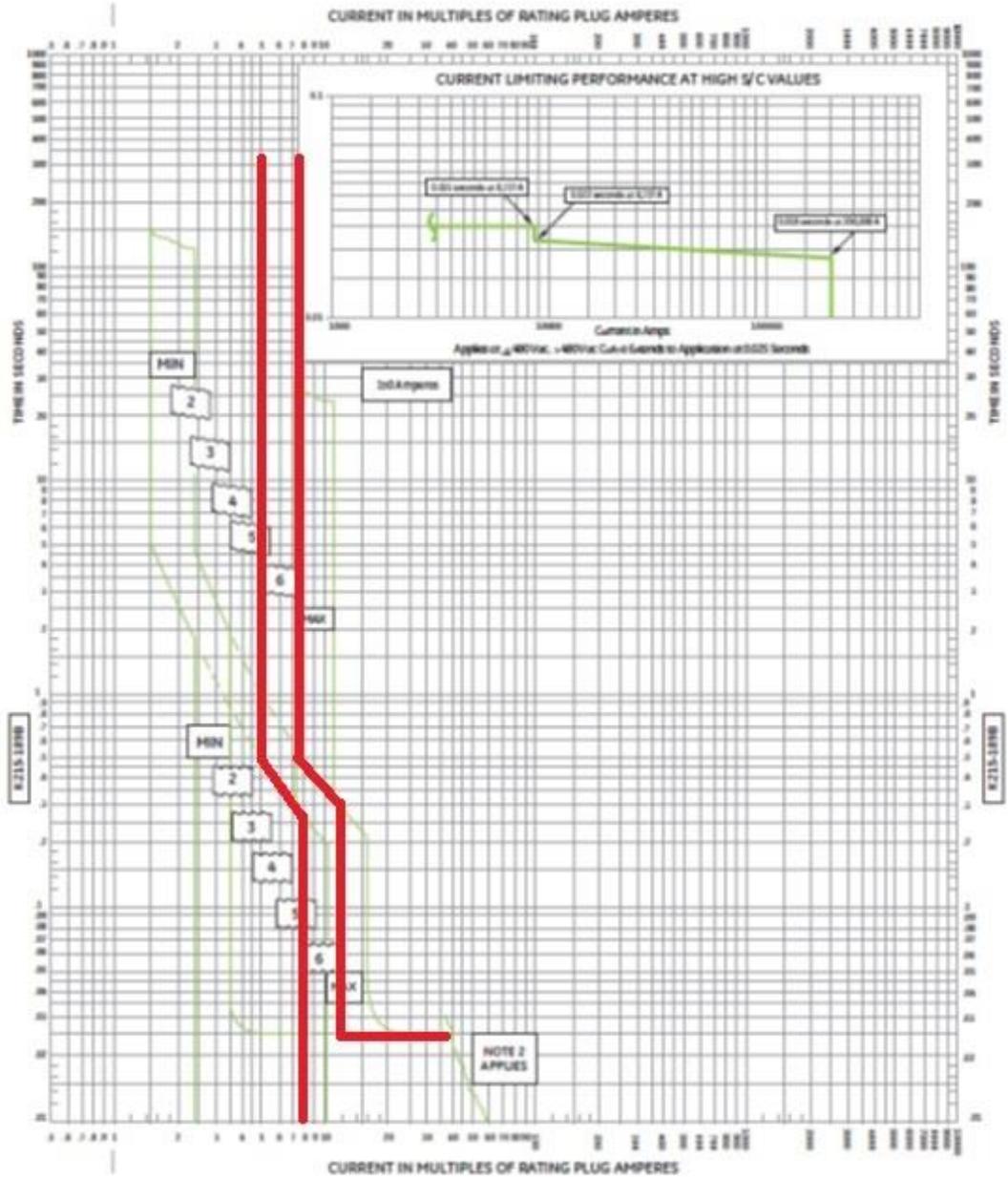
Porcentaje de la velocidad nominal en Rpm	Tiempo en segundos (s)	Corriente en amperios (A)	Factor de escala 150
3.3%=58.74	t=0.1	724.5	4.83
20%=356	t=0.6	680.82	4.52
40%=712	t=1.2	628.65	4.2
60%=1068	t=1.8	541.17	3.17
80%=1424	t=2.4	410.24	2.73
100%=1780	t=3.0	115.0	0.8

Tabla 14. Datos tomados de la curva del relé de protección térmica para llevarlos junto con la curva de interruptor Mag-Break

Setting (ajuste)	Amperio (A)	Factor de Escala 150	Tiempo mínimo (s)	Tiempo máximo (s)
1.2	138	0.9	180	900
1.5	172.5	1.2	60	120
2	230	1.5	33	54
3	345	2.3	15	24
4	460	3.1	9	15
5	575	3.8	7	10
6	690	4.6	4.2	6
7	805	5.4	4	5.8
8	920	6.1	3.7	5.2

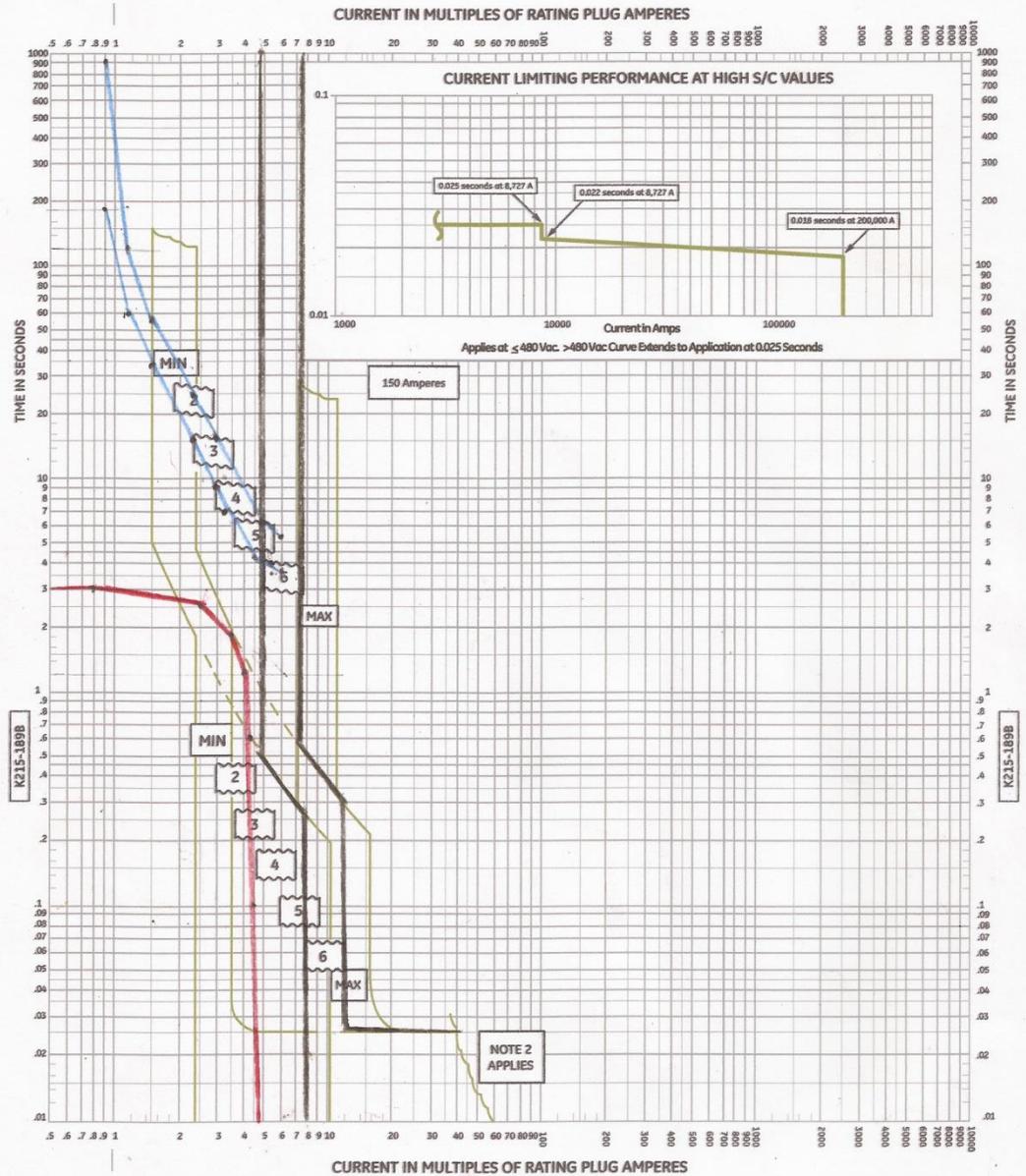
Tabla 15. Capacidad de corrientes de breakers y Mag-break protector de circuito de motor.

Frame	Max. Frame Amps	Rating plug Amps	Instantaneous Trip Settings, Nominal RMS Sym. Amps						
			Trip Setting Adjustment Position						
			Min.	2	3	4	5	6	Max.
	7	3	11	13	16	19	24	31	39
		7	22	27	35	43	56	71	90
	30	15	43	55	69	86	111	143	182
		20	58	74	93	116	151	196	254
		25	73	93	117	147	193	253	332
		30	87	112	142	179	237	314	415
	60	40	118	150	188	237	309	394	501
		50	148	187	236	296	385	498	637
		60	178	224	284	355	454	604	777
	100	70	206	261	329	411	534	684	863
		80	236	299	377	472	614	787	999
		90	267	338	426	532	694	892	1138
		100	297	376	475	593	775	998	1280
	150	110	328	415	524	654	857	1105	1426
		125	374	474	599	745	979	1265	1640
		150	450	570	720	897	1181	1528	1991



<p>GE Consumer & Industrial - Electrical Distribution</p>	<p>MAG-BREAK™ Motor Circuit Protector Type SE with Spectra RMS™ Solid-state Trip</p>	<p>K215-189B</p>				
	<p>Current Ratings</p> <table border="1"> <tr><td>Frame Amps</td><td>120</td></tr> <tr><td>Rating Plug Amperes</td><td>120</td></tr> </table>	Frame Amps	120	Rating Plug Amperes	120	<p>Instantaneous with Tracking Short-time Delay Time-current Curves</p>
Frame Amps	120					
Rating Plug Amperes	120					
<p>Voltage Ratings</p> <table border="1"> <tr><td>7 Pole</td><td>480VAC RMS</td></tr> <tr><td>3 Pole</td><td>600VAC RMS</td></tr> </table>	7 Pole	480VAC RMS	3 Pole	600VAC RMS	<p>Curves apply at 50 to 400 Hertz and from -20°C to 70°C breaker ambient</p>	
7 Pole	480VAC RMS					
3 Pole	600VAC RMS					

Figura 24 Curva de disparo del breaker Mag-Break 36150 de GE en tap 6



GE
GE Consumer & Industrial -
Electrical Distribution

Current Ratings

Frame Amperes	150
Rating Plug Amperes	150

Voltage Ratings

2 Pole	480 Vac max.
3 Pole	600 Vac max.

MAG-BREAK™ Motor Circuit Protector
Type SE with Spectra RMS™
Solid-state Trip

Instantaneous
with Tracking Short-time Delay
Time-current Curves

Curves apply to 50 to 400 Hertz
and from -20°C to 70°C breaker ambient

K215-189B

Adjustments

Instantaneous pick-up settings in multiples
of plug rating: MIN, 2.3A, 5.6 MAX

Note 1: Operation above 60 Hertz and 50° C may require
thermal and interrupting derating of the circuit breaker.
Refer to Selection and Application manual.

Note 2: Current limiting range, please refer to inset curve.

Figura 25. Curva del relé térmico, el breaker y la corriente de arranque

En la figura 25 el eje vertical está mostrando la variabilidad del tiempo; mientras que el eje horizontal, múltiplos de la corriente de la unidad electrónica de 150A. Observe la curva de color rojo, esta es la que corresponde a la evolución de la corriente de arranque del motor. Se inicia con 724.5A ($724.5/150 = 4.83$) y finaliza a los 3 segundos en 115A ($115/150 = 0.8$).

La curva seleccionada del interruptor es la destacada con color negro, tiene el disparo mínimo en la vertical que sube por 1181A ($1181/150 = 7.9$) y el máximo en 1528A ($1528/150 = 10.2$), lo que corresponde a la posición 6; como se puede observar no toca la trayectoria que sigue la corriente de arranque. La curva en azul corresponde a la característica de disparo del relé de protección térmica; provee protección contra sobrecarga sostenidas (largo tiempo) y bloqueo o atascamiento del eje del motor.

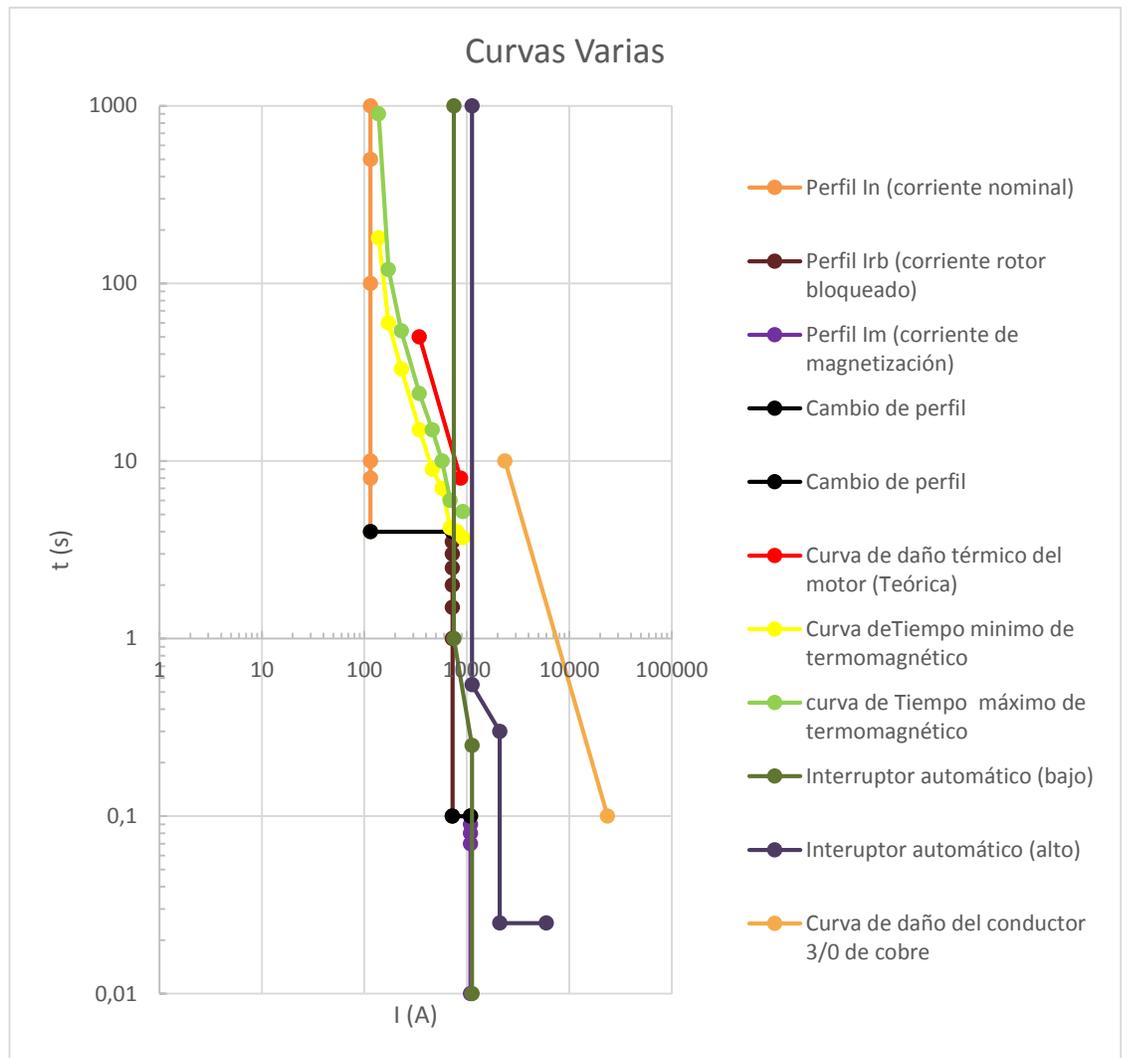


Figura 25 Representación total de las curvas perfil de corriente de motor, daño de motor y daño de conductor entre otras

3.3.6 Determinación del interruptor magnético térmico de control.

El magneto térmico de control es un interruptor termomagnético de reducido tamaño, especialmente diseñado para la protección contra cortocircuitos y sobrecargas en instalaciones eléctricas de bajo consumo; debido a esto, son particularmente útiles en los circuitos de mando y control de los tableros eléctricos

Para determinar el interruptor magneto térmico que protege el circuito de control, es necesario tener el consumo aproximado de todos los componentes del circuito para el peor caso. Así se pudo entonces hacer la siguiente lista en forma aproximada de acuerdo a la contribución de cada componente.

Tabla 16. Consumo de los componentes del sistema de control por máquina

Cantidad	Dispositivo	Consumo (A)
3	Bobinas de contactor CWM150	5.20 A cuando las bobinas entran; tiempo máximo
1	Lámpara de marcha de 22mm, Color verde, bombillo neón.	12mA
1	Lámpara de parada de 22mm, Color rojo, bombillo neón.	12mA
1	Lámpara de parada de 22mm, Color incoloro, bombillo neón.	12mA
1	Selectores M-O-A	12mA
1	Arrancador suave	300 mA
1	Relé Falla de fase	30 mA
Total de consumo		5.578 A

Tal como se observa en la tabla 15 el consumo permanente no llega 400mA, sin embargo se eleva, en forma apreciable, cuando entran las bobinas de los contactores simultáneamente. Este transitorio tiene una duración máxima de 35ms, o sea 0.035s con el pico de 5.20A. Lo que en total pone el consumo en el peor caso en 5.578 A. Observando la gráfica mostrada en la figura 26, el interruptor que mejor se ajusta con estos datos calculados es el que corresponde a 6A de capacidad nominal. Fíjese que la curva que corresponde a la característica B tiene más cerca el pico de consumo 5.578A (<6A), pero no llega a tocarlo pues su duración es de muy corto tiempo. Como en el

circuito de control interviene un dispositivo trifásico, el relé de falla de fase, se toma el interruptor de 3x6A con la característica de disparo en B.

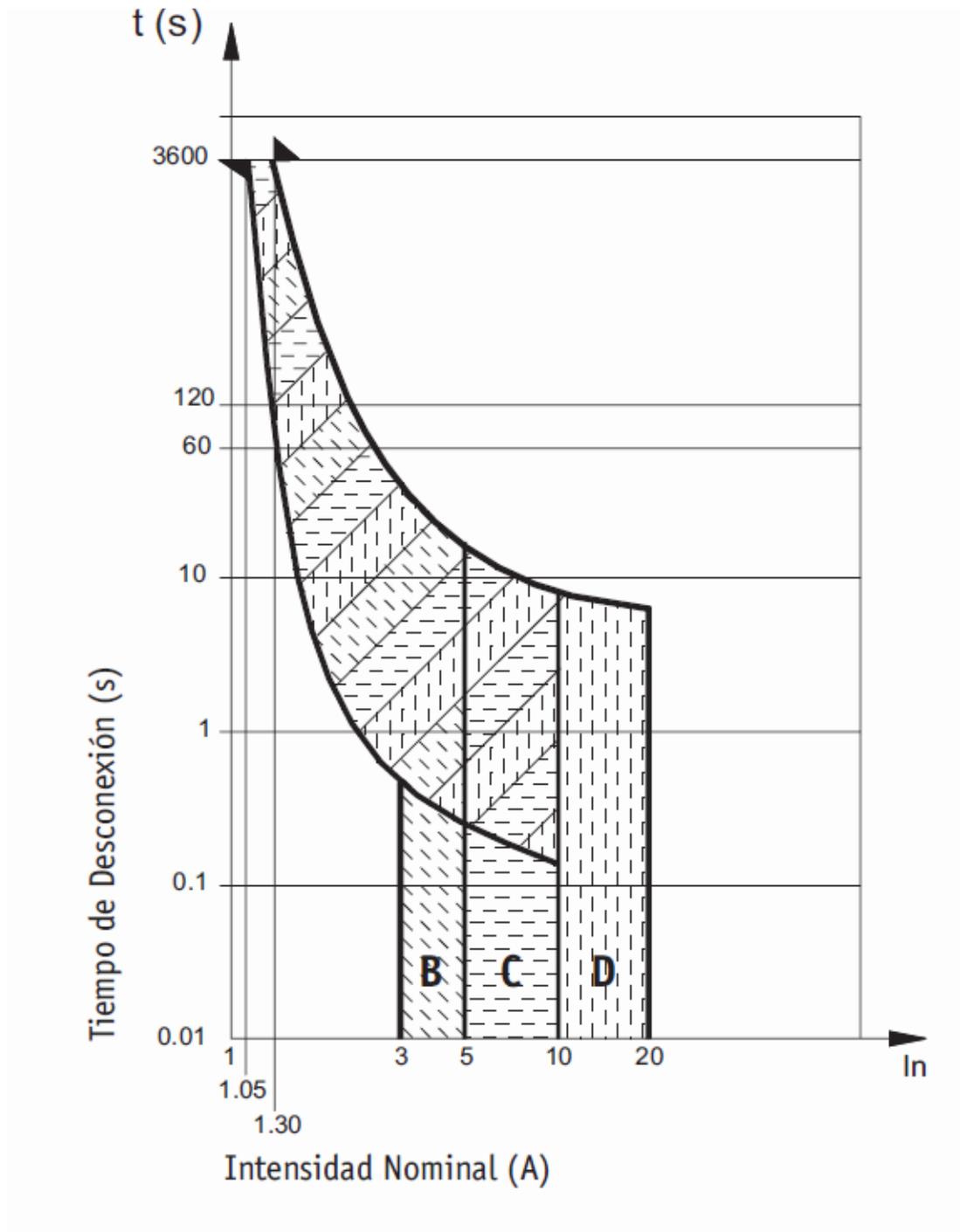


Figura 26. Curva de disparo para interruptores magneto térmicos serie E90 de Maresa

3.3.7 Transformador de control

Para la parte de control se hace necesaria la instalación de un transformador de control, este se escoge, pensando en las siguientes variables: potencia de consumo, voltaje que transformará y tipo de encapsulado. Pensado en una solución comercial se escoge al fabricante Jefferson Electric y uno de los representantes de ventas en Venezuela Energy Tech C.A., y se escoge el siguiente transformador:

Potencia aparente: 350 VA

Relación de transformación doble: 480/240 V lado primario a 120/240 V lado secundario

Modelo: CAT: 631-1810-001 este modelo posee la ventaja de tener un fusible de protección en el lado secundario por eso termina en 001

Group KK Wiring Diagram & Connections

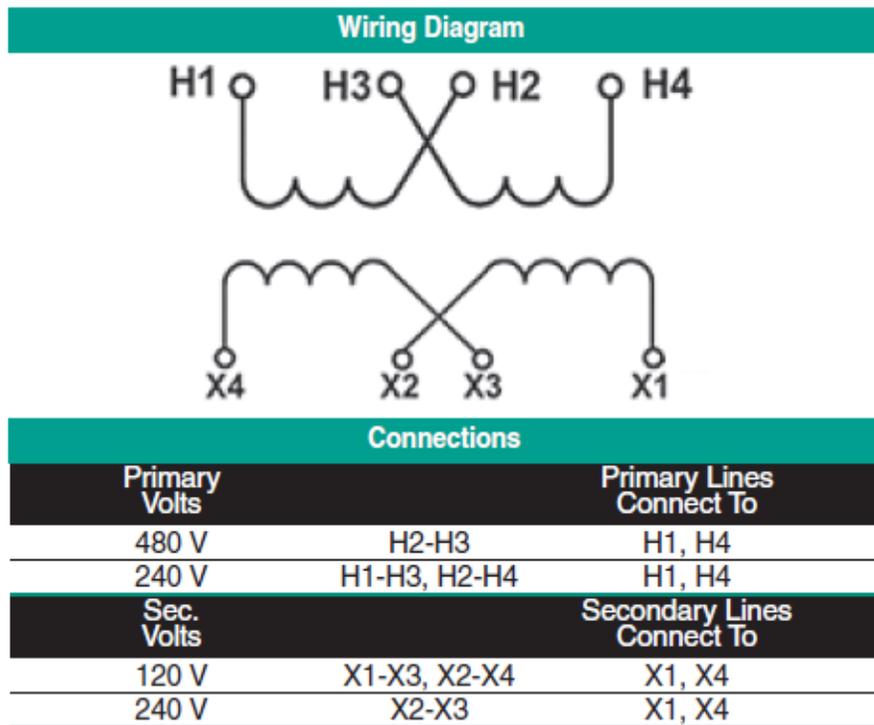


Figura 27. Diagrama de conexiones de transformador de control

3.4 DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES EXTERNOS AL TABLERO DE CONTROL Y POTENCIA

3.4.1 Determinación del flujóstato (sensor de flujo)

Para ofrecer una mayor seguridad a la parte mecánica de la bomba, y alargar la vida útil de las empaaduras se hace necesario la instalación de un sensor de flujo, este será la primera línea de protección en caso que la bomba funcione en vacío, es allí donde el sensor detectara la ausencia de flujo y desconectará el motor eléctrico que acciona la bomba.

El fabricante escogido es Johnson Control, quien tiene representaciones en Venezuela a través de la empresa Pi-productos Industriales S.A, -5C fabricado en acero inoxidable. Se escoge este material porque posee propiedades físicas que lo hacen resistente al agua clorada, alta dureza y con la bondad del acero que ofrece mayor resistencia mecánica a impactos. Este modelo posee encapsulamiento NEMA 3 para recintos de aplicaciones en interiores o al aire libre en ambientes alta humedad. Se utiliza estos modelos en aplicaciones con tuberías que transportan líquidos a temperaturas del punto de rocío o por debajo de 32 ° F (0 ° C), pero por encima de -20 ° F (-29 ° C). En la figura 28 se muestra la variación de presión en función del caudal.

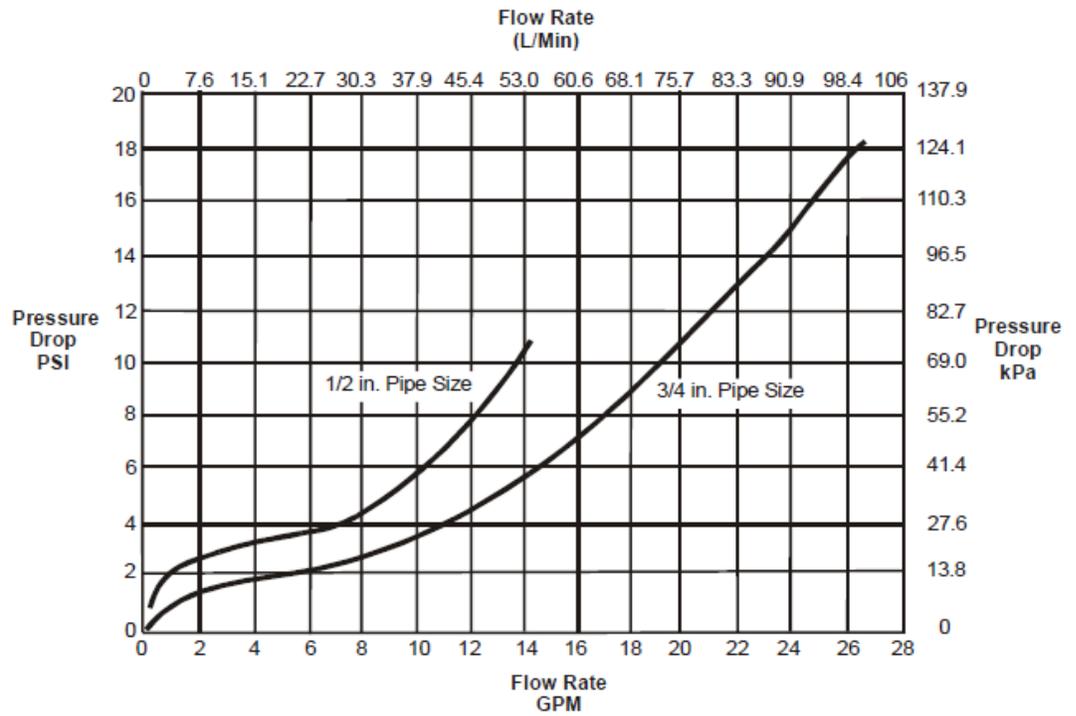


Figura 28. Caída de presión en comparación con el caudal, F61series.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL DEL TABLERO

En la próxima tabla 17 se muestran los elementos originales del diseño de la gaveta de la control de la bomba de condensado de agua del Metro y en el anexo 10 y 11 se muestran los diagramas unifilares de las plantas de refrigeración 1 y 3 respectivamente.

Cantidad	Descripción	Tipo (modelo)
1	Interruptor termomagnético	GE-CAT # TFk236f000, 600 V, 150 A
2	Fusibles	2 A, 600 V, Icc=100kA
1	Fusible	2,5 A, 260 V, Icc= 200KA
1	Protección de sobrecarga	Siemens-Tipo 3UA4300-SAP o Similar Ajustable 55-80 ^a
1	Contactor principal	GE-CAT # CH206E0 o similar, bobina de 120Vac-60Hz, NEMA 3, Contactos AUX 3NA+2NC (CRP # 2) GE-CAT #CR206F00 o similar, Bobina 120Vac- 60Hz, contactos 3NA +2NC
1	Relé de control	GE-CAT # CR120801122 o similar bobina 120 Vac -60Hz Contactos: 1NA + 1NC
1	Relé de control	GE-CAT # CR12080 2022 o similar bobina 120 Vac-60Hz Contactos: 2NA
1	Selector manual o remoto	GE-CAT #CR2840U201 o similar 3 posiciones, 1 polo

2	Pulsadores (star/stop)	GE-CAT # CR2840U301 o similar contactos 1NA +1NC
3	Luces de Indicación	Base GE-CAT # CR2840 o similar Bombillo 125 Vac 6W
1	Transformador de control	480V/120 300VA Tipo seco

Tabla 17. Lista de elementos originales del tablero de control de las bombas de condensado de agua



Figura 29 Tablero de control de bomba de condensado de agua en Planta de Refrigeración 1 Metro de Caracas

4.2 ESQUEMA FINAL DEL TABLERO ELÉCTRICO

En la figura 30 se muestra el diagrama de potencia de la gaveta para la bomba de condensado de agua. Seguidamente se describen los elementos totales que contendrá la gaveta:

Cantidad	Descripción	Tipo (Modelo)
1	Interruptor	General Electric de la serie Spectra RMS Mag-Break con frame 150 y unidad electrónica de 150 A, Icc= 100kA
1	Contactador	WEG, modelo CWM150-22-30-E10, bobina de 110V AC, 150A AC3.
1	Relé térmico	Marca WEG, RW317-1D 3-U150, con rango de ajuste de 100 – 215 A.
1	Breaker magneto térmico de control	3x6A, marca AEG de Maresa, serie. E90
1	Transformador de control	Marca Jefferson Electric, CAT: 631-1810-001 relación de transformación 480/240 a 120/240 V
1	Arrancador suave	Marca WEB, modelo SSW060130T2257SS----Z
3	Fusibles ultra rápidos	FNH2 710A aR WEG
1	Selector Manual-Cero-Automático	Marca Telergón, modelo T -400.
3	Luces de indicación	marca WEG:

		CJ SD1 110Vca Lámpara led color rojo CJ SD2 110Vca Lámpara led color verde CJ SD0 110Vca Lámpara de color led incolor
2	Pulsadores de marcha Start/Stop	marca WEG: CJBD1.10/01 Color Rojo Botón doble contactos 1NA+1NC (STOP) CJBD2.10/01 Color Verde Botón doble contactos 1NA+1NC (START)

Tabla 18. Lista de elementos seleccionado para el nuevo tablero de control de las bombas de condensado de agua

Haciendo un análisis de los puntos 4.1.y 4.2 básicamente ambos tableros presentan los mismos elementos y características similares pero el valor agregado radica en dos componentes que no existían para la época en que inicio operaciones el Metro de Caracas, estos son: El arrancador suave y Los fusibles ultra rápidos.

Cuyas ventajas ya fueron mencionadas con anterioridad.

Los elementos mostrados en la figura 29 forman parte de uno de los tableros de control de una bomba de agua de condensación, este no tiene los elementos originales presentados en la tabla 17.

Nota: A manera de ejemplo y para poder comparar se seleccionaron marcas específicas las cuales podrían ser sustituidas por otras que posean las mismas características.

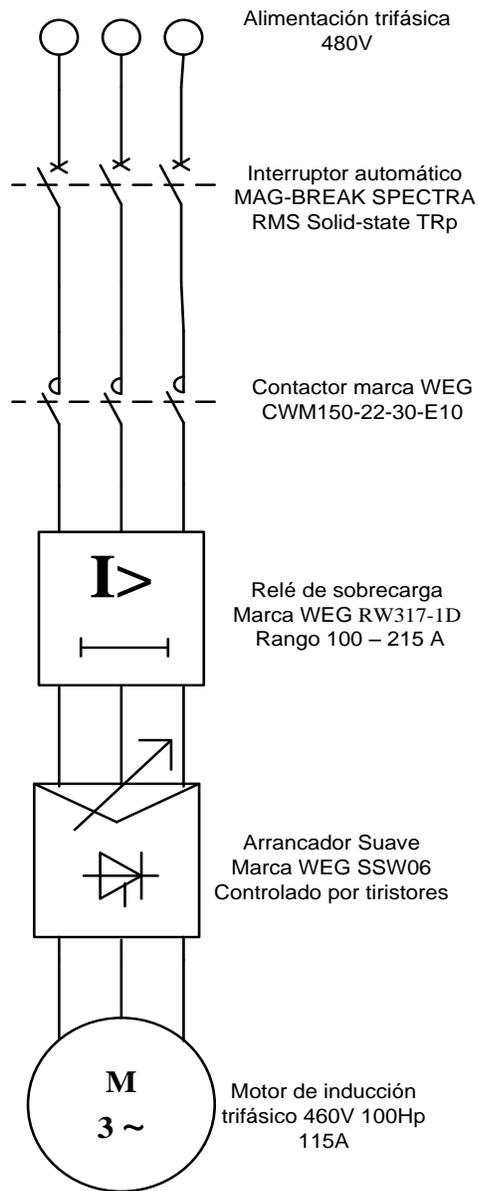


Figura 30. Circuito de potencia de la gaveta para las bombas de agua condensada usando nomenclatura (**norma de simbología IEC 60617**)

Para ver un costo referencial de los elementos del tablero ver anexo 14 recuerden que estos precios varían de acuerdo al índice de inflación.

CONCLUSIONES

Para la modernización de las instalaciones eléctricas de las bombas de agua de condensación de las plantas de refrigeración 1 y 3 del Metro de Caracas según su normativa interna y complementándose con normas nacionales e internacionales se debería realizar un estudio general del sistema general de dichas plantas incluyendo todos sus componentes y sistemas para realizar una modernización total y cabal, pero en este trabajo de grado solo nos dedicamos del sistema de control de las bombas de condensado de agua de las instalaciones ya indicadas.

Se analizó los sistemas de enfriamientos de las plantas centrales de refrigeración 1 y 3 (PR1 y PR3) del Metro de Caracas desde el punto de vista eléctrico determinado sus características principales y las condiciones de operación de las bombas de agua de condensación. Como resultado de la recopilación de información y posterior proceso de cálculo de la propuesta que se presenta, se escoge el uso de un arrancador suave. Dicho arrancador tiene grandes ventajas en este caso como mencionaremos nuevamente, las cuales son: incrementar de la vida útil de las piezas mecánicas de la bomba así como sus tuberías al disminuir el golpe de ariete; la disminución de la interacción humana si se aplica la automatización de bombas en este sistema; el ahorro energético y económico, así como en capital humano para la empresa al no requerir supervisión constante o personal de forma presencial o dedicada en el sitio.

Realizado el diagnóstico del estado físico de equipos y sistemas eléctricos, de las plantas centrales de refrigeración se pudo observar que se requiere: corregir la forma de arando de las motobombas, automatizar los procesos de los sistemas de refrigeración, revisión de los tableros de los Centros de Control de Motores (CCM) ya que se encuentran funcionando de manera inadecuada, revisar el sistema de tuberías para eliminar las fugas de agua de cualquier dimensión que existan.

La elaboración de las especificaciones requeridas para el proyecto según la normativa de la C.A. Metro de Caracas, complementándose con otros estándares nacionales e internacionales se llevo a cabo cuando se determinaron todos los equipos eléctricos, tal como se muestra en el cuerpo de este trabajo de grado, para el diseño de un tablero de control y potencia de 100 Hp para una bomba de condensado de agua; cada uno de estos elementos son ubicables en el mercado interno del país. Así como los componentes se describen asentando sus especificaciones, para ayudar a determinar un componente igual o equivalente en cualquier otra marca, en caso de otra selección o de agotarse la existencia dentro del país.

Se hace mención que las referencias usadas, el fabricante de motores eléctricos Baldor en sus manuales y catálogos no suministra una curva clara de Par en función del tiempo, pero si da los datos de inercia del rotor, por lo cual se logró determinar una protección adecuada calculado el tiempo de arranque en vacío (en forma teórica) y el tiempo de arranque con carga (de forma práctica), partiendo de que el pico máximo ocurre entre los primeros 5 a 8 ciclos del voltaje aplicado y que su comportamiento sigue la evolución de la corriente de arranque que se presenta en la gráfica que muestra la figura 5, y se asume que la aceleración de velocidad, es constante durante dicho periodo. Con estos datos iniciales más los datos de placa del motor se pudieron calcular el perfil de corriente del motor para hacer la selección, determinación y ajuste de las protecciones requeridas.

Mediante esta formulación teórica se obtuvo la protección completa contra sobrecargas y cortocircuitos, se determinó la protección combinada: el termo magnético, contactor, y fusibles ultra rápidos necesarios y adecuados para garantizar la protección eléctrica del motor y asegurar la protección electrónica del arrancador suave.

Se establece una configuración que mejorará la funcionalidad del tablero de control del sistema de bombas de condensación para ello se escogió un arrancador suave como medio de inicio del motor básicamente por tres razones: ahorro energético durante el arranque, protección contra “el golpe de ariete” en las partes internas de la bomba así como en sus correspondientes tuberías y abre la posibilidad a la automatización del sistema en un futuro mediante una plataforma Network/TCP.

Todas estas ventajas representan un salto tecnológico que no poseía el sistema original y significa una mejora positiva en el diseño, ahorro de dinero en la empresa relativo a disminución de gasto energético, incremento de fiabilidad y disminución en las jornadas de mantenimiento.

La instalación de un arrancador suave se pensó para que fuese flexible, pues muchos de sus parámetros se pueden ajustar al momento de puesta en marcha del equipo. Resultando muy conveniente, por ejemplo, en las temporizaciones de entrada y salida, pues dispone de teclado y pantalla LCD.

Se realiza este proyecto con el nuevo sistema eléctrico según las especificaciones elaboradas dando así respuesta las necesidades actuales de funcionamiento, control y automatismo para adecuar el funcionamiento de las bombas de condensado de agua en un rango aceptable a su uso permitiendo extender su vida útil.

Dada la situación actual del país la implementación de la modernización del sistema de climatización no es una prioridad en la compañía Metro de Caracas por lo cual esta implementación podría retrasarse, pero la propuesta que se llegó en este trabajo a la larga daría ahorros significativos en la empresa en costo de mantenimiento de las tuberías ya que las actuales tienen 40 años de funcionamiento.

Para el momento de presentación de esta tesis las plantas de refrigeración 1, 2 y 3 no están operativas, entre los factores que han motivado el paro de funcionamiento de estas plantas están:

- 1.- Fallas en los tiristores de los chiller (causas actualmente en evaluación)
- 2.- En caso de la planta PR1 sufrió desvalijamiento o robo por parte de presuntos indigentes

Debido a esta situación actualmente, para julio de 2016, más de 50% de las estaciones de Línea 1 no tiene climatización operativa. Para comprenderlo se debe saber que las estaciones de Metro de Caracas pertenecientes a la Línea 1, que opera desde Propatria a Palo Verde, cuenta con un total de 22 estaciones.

Las Plantas de Refrigeración 1, 2 y 3 dan soporte a 14 de estas estaciones, las cuales están inoperantes en su sistema de climatización, ello influye en la calidad de servicio para el público en general, pero también afecta a todos los equipamientos y materiales de Metro que son sensibles a temperaturas elevadas disminuyendo así su calidad y/o vida útil. Un ejemplo de ello podría ser el deterioro constante y en aumento de equipos eléctricos, mecánicos y electrónicos como: las empaaduras, gomas, correas, piezas de computación, torniquetes y en general todo aquel equipo que requiere una temperatura estable para su adecuado funcionamiento u óptima duración en el tiempo.

Por ello este trabajo de grado muestra un camino para la resolución de uno de los problemas que afectan de manera importante a Metro de Caracas y que podría redundar en ahorro a corto, mediano y largo plazo, al evitar daños mayores o gastos a destiempo que puede generar esta situación en el presente y futuro de sus instalaciones.

RECOMENDACIONES

Una forma de ver más claramente las bondades que ofrece este tipo de modernización es llevarlo a la fase de: construcción, instalación y puesta en marcha.

En la etapa de construcción se verificará lo comercial que es esta solución, pues las piezas que conforman este diseño están disponibles a través de distintos fabricantes con representantes nacionales e internacionales que radican en Venezuela.

La instalación deberá ser parecida a los equipos que acostumbra a manejar el personal de área de protecciones del Metro, ya que cuenta con componentes similares.

Es recomendable reutilizar las gavetas del centro de control de motores (CCM) para aprovechar los recursos existentes que aún son utilitarios y se encuentran en buen estado, en caso contrario, que se requiera su cambio, se recomienda contactar empresas que ofertan equipos como los requeridos. Ejemplo en el anexo 12 se especifican acerca de los gabinetes para el CCM.

Como directriz finales se recomienda instalar en los motores un termostato cuya señal de control deberá ser conectadas en el arrancador suave y así se aprovechará en forma completa la protección térmica que este presenta, también sería útil instalar unos fusibles ultra rápidos en la entrada de corrientes del arrancador con el fin de dar mayor protección a los tiristores.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Pulido, Manuel. Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR, Editorial Macombo, S.A. Barcelona, España, 2000
- Enríquez Harper, Gilberto Elementos de Diseño de las Instalaciones Eléctricas Industriales, Limusa Noriega Editores S.A. México D.F., México, 2004
- FONDONORMA (200:2009) Código Eléctrico Nacional –Caracas. Convenio de Elaboración de normas FONDONORMA- CODELECTRA Secciones 310, 420 y 440.
- Hernández, Román G.; Rosas R., Francisco J. y Santana G., Jorge Coordinación de protecciones para un sistema eléctrico industrial (Tesis)--México D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2009
- Kosow, Irving. Máquinas eléctricas y transformadores, 2da Ed. España: Reverte, S.A., 1974.
- Lobosco, Orlando S. Selección y Aplicación de Motores Eléctricos. Tomo 1. Editorial Macombo S.A. y Siemens Aktiengesellschaft, España
- Manual Aparatos de Maniobras de Baja tensión. Contactores, Relés Térmicos de Sobre intensidad AEG.
- Manual Aparatos de Maniobras de Baja tensión. Contactores, Relés Térmicos de Sobre intensidad WEG.
- Manual de Arrancador suave de WEG
- Manual de Instalaciones y Mantenimiento de Motores Eléctricos, WEG MOTORS DRIVES
- Manual Spectra RMS Model Case Circuit Breakers. Ge Consumer and Industrial Electric Distribution 2008.
- Merino Azágarra, José María. Arranque industrial de motores asincrónicos McGraw Hill, España 1995

- Norma Cadafe 42-87 Regulación de tensión en el sistema de distribución
- Norma Covenin 159-2005 Tensiones normalizadas de servicio
- Norma Simbólica IEC 60617
- Oños Prados, Enrique. Maniobra, mando y control eléctrico. Barcelona, España 1974
- Stephen J. Chapman. Máquinas Eléctricas 4^{ta} edición McGraw Hill, México 2005

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Martínez, Ángelo Selección de las bombas del sistema hidráulico de tuberías de agua helada para los edificios Centro de Control de Operaciones (CCO) y Josefa Camejo (EANEX) de la C.A. Metro de Caracas (Tesis) --Caracas: Universidad Simón Bolívar, 2012. p. 17-22

[2] Merino A., José M. Arranque industrial de motores asincrónicos Teoría, cálculo y aplicaciones (Libro)-- Madrid: España Ed. McGraw-Hill, 1995. P.p. 10-11 y p.p. 33-37

[3] Rodríguez H., Frank D. Diseño de un tablero de control y potencia para el sistema de presión constante de tres bombas iguales de 25Hp en 220V (Tesis) --Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2011. P.p 8-13

[4] Wikipedia, [en línea].

[https://es.wikipedia.org/wiki/Contactor#Criterios para la elecci.C3.B3n de un contactor](https://es.wikipedia.org/wiki/Contactor#Criterios_para_la_elecci.C3.B3n_de_un_contactor)

[Consulta: Junio 2016]

[5] Wikipedia, [en línea].

https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_flujo

[Consulta: Junio 2016]

[6] Alvares P. Manuel Convertidores de Frecuencia, Controladores de Motores y SSR(Libro) -- Barcelona: España Ed. Macombo S.A., 2000. P.p. 97-99

[7] Manual online de Automatización Arrancadores Suaves WEG, [en línea].

<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-ssw-series-arrancadores-suaves-50024195-catalogo-espanol.pdf>

[Consulta: Junio 2016]

P.p. 9-13

[8] Catálogo de selección de arrancadores suaves, [en línea].

http://www.kamatiltda.com/Kamati/SIEMENS_files/Dimensionamiento%20de%20Arrancadores%20Suaves.pdf

[Consulta: Junio 2016]

P. 1

[9] Manual en línea de Fusible ultra rápidos WEG [en línea].

<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-fusibles-ultra-rapidos-tipo-nh-ar-50030486-catalogo-espanol.pdf>

[Consulta: junio 2016]

[10] Catálogo en línea de Baldor [en línea]

<http://www.baldor.com/catalog/MST-175-CA>

[Consulta: julio 2016]

[11] Enríquez Harper, Gilberto Elementos de Diseño de las Instalaciones Eléctricas Industriales, Limusa Noriega Editores S.A. México D.F., México, 2004. P.p 207

[12] Hernández, Román G.; Rosas R., Francisco J. y Santana G., Jorge Coordinación de protecciones para un sistema eléctrico industrial (Tesis)--México D.F.: Instituto politécnico Nacional, 2009 P.p 110-114

[13] Figueroa, Joel Diapositivas: Unidad III Protección contra sobrecorriente [en línea]

<http://files.informacionclasesiupsm.webnode.com.ve/200000045.../UNIDAD%20III.pdf>

[Consulta: julio 2016]

P.p 100-103