



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

**OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL VAPOR EN LA PRODUCCIÓN DE
AZÚCAR Y LA COGENERACIÓN ELÉCTRICA DEL INGENIO
SANTA ANA**

JOSÉ MANUEL RIVAS MÉNDEZ

ASESOR: ING. GUTY RONALD TOBÍAS CHAVARRÍA

Guatemala, agosto de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL VAPOR EN LA PRODUCCIÓN DE
AZÚCAR Y LA COGENERACIÓN ELÉCTRICA DEL INGENIO SANTA
ANA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ MANUEL RIVAS MÉNDEZ

ASESORADO POR: ING. GUTY RONALD TOBÍAS CHAVARRÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

HORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL VAPOR EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y LA COGENERACIÓN ELÉCTRICA DEL INGENIO SANTA ANA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha junio 12 de 2003.

José Manuel Rivas Méndez

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su gran amor y por permitirme alcanzar esta meta de mi vida
Mi padre	Jorge Luis Rivas Ríos Por todo su amor, esfuerzo entregado para salir adelante en la vida y sobre todo porque <i>“largo es el camino de la enseñanza por medio de teorías; breve y eficaz por medio de ejemplos”</i> , Séneca.
Mi madre	Teresa Edelmira Méndez Recinos † Por haber sido mi primer y único gran amor, el cual, junto a sus sabios consejos, me acompañan siempre.
Mis hermanos	Jorge Luis, Dany Fernando y Ligia Marilú Por su cariño y por todo el tiempo compartido.
Mi esposa	Bianka Macal Por su amor, comprensión y apoyo a lo largo de mi vida.
Mi hija	María Teresa Por su amor, ternura y sobre todo por haber llenado un gran vacío en mi vida
Mis abuelos	Por ser, también, un gran apoyo en mi vida, por su atención y consejos.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

Al	Ingeniero Guty Tobías por su colaboración y paciencia para la realización de este trabajo.
A	Los compañeros de trabajo de la división industrial por su ayuda brindada para poder realizar este trabajo
A	Mis amigos y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron conmigo para el presente trabajo.
Al	Ingenio Santa Ana

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VI
LISTA DE SÍMBOLOS	X
GLOSARIO	XII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1 MARCO TEÓRICO	1
1.1. Turbinas de vapor	1
1.1.1. Turbinas del tipo de impulso o acción	2
1.1.2. Otros tipos de turbinas	4
1.1.3. Rendimiento de las turbinas de vapor	5
1.1.4. Eficiencia de máquina	8
1.1.5. Consumo de vapor	9
1.2. Turbogeneradores	10
1.2.1. Generadores sincrónicos	10
1.2.2. Generadores enfriados por aire	12
1.2.3. Generadores enfriados por hidrógeno	13
1.2.4. Generadores enfriados por hidrógeno-agua	14
1.3. Motores eléctricos	15
1.3.1. Circuito equivalente del motor de inducción	16
1.3.2. Clasificación de los motores eléctricos de acuerdo con su sistema de protección	16
1.3.3. Clasificación de los motores eléctricos de acuerdo con sus Características eléctricas	17
1.3.4. Consideraciones para aplicaciones de los motores	17

1.3.4.1	Diseño clase A: Par nominal de arranque, corriente nominal de arranque, bajo deslizamiento	18
1.3.4.2	Diseño clase B: Par normal de arranque, baja corriente de arranque, bajo deslizamiento	18
1.3.4.3	Diseño clase C: Alto par de arranque, baja corriente de arranque	19
1.3.4.4	Diseño clase D: Alto par de arranque, alto deslizamiento	19
1.4	Curvas Par – Velocidad	20
1.4.1	Par inducido en el motor de inducción	22
1.5	Tipos de arranque de los motores de inducción	23
1.5.1	Arrancadores de corriente alterna entre los lados de la línea	23
1.5.2	Auto transformadores de arranque	24
1.5.3	Arrancadores de resistor primario	25
1.5.4	Arrancadores estrella delta	26
1.5.5	Arrancadores de estado sólido	27
1.5.6	Arrancadores para motores de CA de anillos colectores	28
1.6	Variadores de frecuencia	29
1.6.1	Terminología y definiciones de los variadores de frecuencia	30
1.6.2	Semiconductores para convertidores de frecuencia	31
1.6.2.1	Historia del semiconductor de potencia	31
1.6.2.2	Comparaciones generales en los dispositivos semiconductores	33
1.6.3	Clasificación de los variadores de frecuencia	34
1.6.3.1	Variador con fuente de corriente	35
1.6.3.2	Variador con fuente de voltaje	36

1.6.3.3	Variadores PWM multinivel	37
1.6.3.4	Niveles de salida	38
1.6.4	Efecto de los armónicos de los variadores de frecuencia PWM	39
2.	DISEÑO DE SISTEMA MOTOR, VARIADOR DE FRECUENCIA	42
2.1	Antecedentes	42
2.2	Propuesta	45
2.3	Cálculos para la selección de motor de inducción	48
2.3.1	Potencia requerida	51
2.3.2	Velocidad de operación	51
2.3.3	Par de arranque necesario	52
2.3.4	Condiciones de ambiente	52
2.3.5	Características de alimentación eléctricas	54
2.4	Cálculos para la selección de un variador de frecuencia	55
2.4.1	Situación de instalación y ambiente operacional	55
2.4.2	Características eléctricas de alimentación	55
2.4.3	Potencia del motor	55
2.4.4	Corriente del motor	55
2.4.5	Tipo de variador	56
2.5	Cálculos para seleccionar barras de alimentación de sistema	56
2.5.1	Carga instalada	56
2.6	Dimensionamiento de protecciones para sistema barra, motor y variador de frecuencia	58
2.6.1	Cálculo de corriente de cortocircuito	58
2.6.2	Cálculo de CT's para motor y barra	63
2.6.3	Cálculos para escoger las curvas de disparo de los relees de motor y de barra	66
2.6.3.1	Corriente a plena carga	67
2.6.3.2	Protección por sobrecarga del motor (51)	68

2.6.3.3	Protección por sobrecarga inmediata	70
2.6.3.4	Protección por baja corriente (37)	71
2.6.3.5	Protección por desbalance de fases (46)	71
2.6.3.6	Configuración del Pick Up de disparo por desbalance	72
2.6.3.7	Protección por cortocircuito (50)	73
2.6.3.8	Protección por falla instantánea a tierra (50G)	74
2.6.3.9	Protección por temperatura del estator (49)	74
2.6.3.10	Protección por temperatura de rodamientos (38)	75
2.6.3.11	Protección de barra alimentadora o bus	76
2.6.3.12	Protección por sobrecarga (51)	77
2.6.3.13	Protección por bajo voltaje (27)	80
2.6.3.14	Protección por alto voltaje (59)	80
2.6.3.15	Protección por cortocircuito (50)	81
2.6.4	Coordinación de protecciones	82
2.7	Dimensionamiento de conductores para alimentación de sistema barra, motor y variador de frecuencia	83
2.8	Cálculos para la selección de un sincronoscopio	86
2.8.1	Voltaje de alimentación del equipo	88
2.8.2	Voltaje de señales de entrada	88
2.8.3	Señales auxiliares de control de entrada	89
2.8.4	Señales auxiliares de salida	89
3	SIMULACIÓN Y PRUEBAS	92
3.1	Diseño de un modelo electromecánico a escala	93
3.2	Procedimiento de puesta en marcha del modelo a escala	97
4	EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA	101
4.1	Análisis económico del proyecto	101
4.1.1	Costos de producción de vapor	105

4.1.2 Costos de generación eléctrica	107
4.1.3 Costos de inversión del proyecto	109
4.2 Análisis costo – beneficio del proyecto	111
4.2.1 El valor presente neto	112
4.2.2 La tasa interna de retorno	114
CONCLUSIONES	116
RECOMENDACIONES	118
BIBLIOGRAFÍA	120
APÉNDICES	122

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.0	Esquema de una turbina de tipo acción	3
1.1	Diferencia de funcionamiento entre turbina de acción y reacción	4
1.2	Turbina con condensación	5
1.3	Ciclo de Rankine	6
1.4	Diagrama de Mollier	8
1.5	Generador eléctrico tipo TEWC	13
1.6	Generador enfriado por hidrógeno	14
1.7	Generador enfriado por hidrógeno/agua	14
1.8	Típico motor de inducción	15
1.9	Circuito equivalente del motor de inducción	16
1.10	Tipos de rotor de motor de inducción	17
1.11	Curvas Par-Velocidad de diferentes diseños de rotor	20
1.12	Curva par velocidad de un motor eléctrico	21
1.13	Arranque directo de motor desde la fuente de alimentación	24
1.14	Auto transformador de arranque	25
1.15	Arranque por resistores	26
1.16	Diagrama arranque estrella delta	27
1.17	Arrancador de estado sólido	28
1.18	Diagrama elemental de los variadores de frecuencia	29
1.19	Desarrollo de los semiconductores	32
1.20	Variador con fuente de corriente	35
1.21	Variador con fuente de voltaje	36
1.22	Variador multinivel con fuente de voltaje	38
1.23	Onda de voltaje de salida de un variador con 3 niveles de salida	38
1.24	Onda de voltaje de salida de un variador con 9 niveles de salida	39

1.25	Planta con carga del convertidor, Trafo. De red y otras cargas	40
1.26	Características del sistema de accionamiento que afectan los armónicos	40
2.1	Diagrama de proceso de la caña de azúcar	43
2.2	Configuración actual del molino	44
2.3	Circuito de vapor	44
2.4	Sustitución de turbina por motor eléctrico	45
2.5	Circuito de vapor final	46
2.6	Diagrama unifilar de la conexión de motores en el área de molinos	46
2.7	Curva Par-Velocidad reductor	51
2.8	Ubicación geográfica del departamento de Escuintla	52
2.9	Diagrama unifilar del proyecto	57
2.10	Diagrama unifilar del sistema	58
2.11	Representación del diagrama unifilar en el programa ELPLEK 0.8	60
2.12	Localización de la falla eléctrica	60
2.13	Corrida del programa para cálculo de corriente de cortocircuito	61
2.14	Reporte de corrientes del diagrama unifilar	62
2.15	Relé multifunción para protección de motor	66
2.16	Curvas de disparo de relé multifunción para el motor	67
2.17	Localización de la curva para protección del motor	69
2.18	Curva de protección para motor de inducción de 900 HP	70
2.19	Diagrama esquemático del relé multifunción para barra	76
2.20	Curvas ANSI de acuerdo al tap No. 1 desde E. inversa hasta M. inversa	79
2.21	Curvas de sobrecorriente para motor y barra	82
2.22	Alimentación eléctrica del sistema propuesto	83
2.23	Escala de sincronoscopio	87

2.24	Diagrama de conexión de sincronoscopio electrónico	90
2.25	Conexión final de sincronoscopio	91
3.1	Diagrama de conexión de modelo a escala	93
3.2	Imagen del motor eléctrico utilizado	94
3.3	Imagen de variador de frecuencia utilizado	94
3.4	Imagen de sincronoscopio	95
3.5	Imagen de modelo a escala completo	96
3.6	Formas de onda de las dos fuentes	97
3.7	Ondas de voltaje en fase antes de la sincronización	98
3.8	Ondas de voltaje en fase	99
4.1	Circuito de vapor en el área de molinos	101
4.2	Diagrama de flujo de efectivo del proyecto	112
A1	Eficiencias de varios sistemas	122
A2	Sistema mejorado	123
A3	Comparación del número de fallas entre el IGCT y el IECT	124
B1	Forma típica del pulso de salida en un VDF PWM	125

TABLAS

1.0	Características de los semiconductores	32
1.1	Comparación entre variadores fuente de corriente y voltaje	37
1.2	Factores y sus efectos	41
1.3	Porcentaje de armónicos de acuerdo al tipo de rectificador	41
2.1	Torque y velocidad para reductores	50
2.2	Temperatura y humedad relativa mínima y máxima de 1998 a 2003, Estación Santa Ana	53
2.3	Datos técnicos de barra infinita	59
2.4	Datos técnicos de transformadores	59
2.5	Datos técnicos de generadores	59

2.6	Datos técnicos de motores	59
2.7	Clases de transformadores de corriente	63
2.8	Relaciones de transformación de CT's	64
2.9	Características generales para motores eléctricos en media tensión	68
2.10	Tiempos en segundos para disparo por sobrecorriente de fase	71
2.11	Resistencia vrs. temperatura de diferentes termocoplas	75
2.12	Constantes de curvas ANSI	77
2.13	Valores de tiempo para las diferentes curvas ANSI	78
2.14	Valores de corriente por unidad para el bus de alimentación	79
2.15	Capacidades de cables eléctricos	85
4.1	Costos de mano de obra por día de operación en la caldera	106
4.2	Costo anual de mantenimiento turbogenerador 15 MW	107
4.3	Costo de materiales para inversión del proyecto	109
4.4	Flujos de efectivo	112
B1	Máxima longitud de cable recomendada para el motor	131

LISTA DE SÍMBOLOS

W	Trabajo
Q_{abs}	Calor absorbido
Q_{ced}	Calor cedido
h	Entalpía
p	Presión
J	
TSR	Consumo de vapor teórico
η	Eficiencia
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
MVA	Unidad de potencia eléctrica aparente (Mega volt ampere)
NEMA	National Electrical Manufacturing Association
HP	Caballos de fuerza
T	Torque o par
ω	Velocidad nominal
P	Potencia en watt
R	Resistencia en Ohms
I	Corriente
3ϕ	Trifásico
Y Δ	Estrella delta
CC	Corriente continua
PWM	Modulación por ancho de pulso
Rpm	Revoluciones por minuto
MW	Unidad de potencia real (Mega watt)
BFF	Barra de frecuencia fija
BFV	Barra de frecuencia variable
Hz	Unidad de medida de frecuencia eléctrica (Hertz)

VFD	Variador de frecuencia
IGBT	Transistor bipolar de compuerta aislada
ANSI	Sociedad americana de estándares
RCT	Relación de transformación de CT
CT	Transformador de corriente
KA	Unidad de medida de corriente (Kilo amperes)
LRT	Constante de tiempo de rotor bloqueado
LRC	Corriente a rotor bloqueado
Kwh	Unidad de media de energía eléctrica (kilo watt hora)
Psi	Unidad de medida de presión (libras/pulgada cuadrada)
PT	Transformador de potencial para medición
RPT	Relación de transformación de PT

GLOSARIO

Álabe	Parte que compone el rotor de una turbina de vapor en donde recibe el chorro de vapor y lo convierte en energía mecánica.
Armónicas	Distorsiones múltiplos de la frecuencia fundamental en las ondas de voltaje y corriente provocadas por equipo electrónico.
Ampere	Unidad de medida de la corriente eléctrica
Bagazo	Desecho fibroso de la caña de azúcar
Baja tensión	Nombre que se le da a los niveles de voltaje debajo de 1000 volts
Bus	Barra o fuente de distribución principal a la que están conectados varios equipos.
Ciclo de Rankine	Consiste en un ciclo termodinámico cerrado que consta de una caldera, una turbina, un condensador y una bomba.
Corriente de arranque	Corriente en amperios con la cual un motor pasa desde su estado estacionario a su estado nominal.
Corriente Pick Up	Se le llama así a la corriente base que se utiliza para calcular la protección de algún dispositivo eléctrico.

Cortocircuito	Condición de falla causada por la conexión accidental de dos o más fases entre sí o de fase a neutro.
Deslizamiento	Diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del motor
Diagrama unifilar	Simplificación de un sistema eléctrico, representado por medio de una línea y de símbolos normalizados, a las líneas de transmisión, distribución y aparatos o dispositivos asociados a éste.
Dispositivos de estado sólido	Dispositivos electrónicos semiconductores.
Falla instantánea a tierra	Condición de falla causada por la conexión accidental de una fase a tierra.
Media tensión	Nombre que se le da a los niveles de voltaje entre 1001 y 25,000 volts
Ohm	Unidad de medida de la resistencia eléctrica
Par de arranque	Par o torque que entrega el motor eléctrico cuando pasa de su estado estacionario a su estado de trabajo.
Potencia	Capacidad que tiene un cuerpo de efectuar un trabajo en un tiempo determinado
Reductor de velocidad	Conjunto de engranajes, acoplados entre sí, que permiten la reducción de velocidad.

Relé multifunción	Dispositivo electrónico para protección eléctrica de un equipo. Se llama multifunción, ya que un solo aparato puede tener varias protecciones para un mismo circuito.
Sincronización	Maniobra para conectar dos o más fuentes de voltaje en paralelo, a la misma frecuencia, voltaje y ángulo de fases.
Switcheo	Llámesese así al conjunto de maniobras repetitivas del estado de conducción al de no conducción y viceversa de un dispositivo semiconductor.
Tritón	Bio-gas utilizado para enfriamiento de generadores eléctricos
Tobera	Dispositivo que sirve para direccional el vapor hacia los álabes.
Turbogenerador	Se le llama así a la unión de una turbina con un generador eléctrico
Volt	Unidad de medida de la diferencia de potencial entre dos puntos.
Zafra	Época en la cual se puede cosechar la caña de azúcar. Normalmente entre los meses de noviembre a mayo.

RESUMEN

Antes de la década de los ochenta, la Agroindustria azucarera, para operar, necesitaba mover su maquinaria a partir de turbinas de vapor. Esto era, en ese entonces, una forma de ahorro de energía eléctrica, ya que, el negocio de la cogeneración todavía no era la principal visión de los empresarios. Las turbinas de vapor pueden accionar diversos equipos. Estas máquinas han establecido su gran utilidad como motores primarios y se fabrican para accionar diversos equipos como: generadores eléctricos, bombas, compresores; y, también para impulsar barcos a través de mecanismos adecuados. En las industrias de proceso, como, en la del azúcar, se utilizan grandes cantidades de vapor, pudiéndose generar energía eléctrica como subproducto en cantidad considerable, elevando la presión en la caldera por encima de la presión del proceso y expandiendo el vapor en una turbina sin condensación antes de descargarlo al proceso.

En un ingenio azucarero, el área de mayor consumo de energía es la molienda, ya que, es en ésta área donde se encuentra la mayor parte de turbinas de vapor las cuales trabajan en el mismo. Debido a que la eficiencia promedio estas turbinas es del 70%, se decidió hacer un estudio para ahorrar energía en esta parte del proceso del azúcar.

Hasta hace 10 años, los motores eléctricos eran poco frecuentes para el accionamiento de los molinos de caña, sin embargo, actualmente, para una producción más eficiente y mejor controlada, es una necesidad. El motor eléctrico, al accionarlo mediante variador de frecuencia, presenta muchas ventajas respecto de las turbinas a vapor. Entre las principales se tiene el control completo y definido de la operación, ya que, cada molino tendría un control individual sobre sí mismo sin verse afectado por la presión de vapor, el

costo bajo de mantenimiento, el control preciso de la velocidad y sentido de rotación, los costos de operación se reducen respecto a los de una turbina de vapor y lo más importante, el ahorro de energía, pues el vapor que consume una turbina, puede ser direccionado a la turbina de un turbogenerador con el fin de producir energía eléctrica, la cual, al restarle el consumo del motor, se convierte en un excedente para suministrarlo como venta a la empresa encargada de la distribución de la misma.

Los variadores o convertidores de frecuencia son sistemas eléctricos que emplean dispositivos de estado sólido para variar la frecuencia y el voltaje, en la entrada del motor eléctrico de acuerdo con las necesidades de la carga. Independientemente del tipo de dispositivo electrónico con el que estén contruidos, se clasifican en dos topologías: fuente de corriente y fuente de voltaje. El tipo fuente de voltaje posee un capacitor conectado al bus de DC el cual tiene como función, mantener el voltaje constante en el bus, además de almacenar energía a la hora que está en modo regenerativo, o sea, cuando el motor está siendo frenado. El tipo fuente de corriente posee un reactor conectado en serie al bus de DC cuya función principal es almacenar corriente que, al ser conmutada por los rectificadores controlados, produce el voltaje y corriente en las terminales del motor.

Otro tipo de variadores utilizados para aplicaciones en mediano voltaje, son los variadores PWM multinivel. Este tipo de variadores toma el voltaje y frecuencia de la red principal y la convierte en DC utilizando un modulador de ancho de pulso para simular una onda senoidal en las terminales del motor. Estas modulaciones, para bajo voltaje se dan en dos niveles, pero en mediano voltaje los valores se presentan de otra forma. La magnitud más grande en medio voltaje es de 4160 Volts rms y un voltaje pico de 5820 Volts, pues, cada uno de los dispositivos electrónicos no puede conmutar este nivel de voltaje en

un sólo paso porque, además de que no lo soportaría, se puede dañar el aislamiento del motor, se crean múltiples niveles de conmutación entre esos niveles, conectando varios dispositivos rectificadores en serie para que soporten dichos picos de voltaje.

Con la construcción de un modelo electromecánico a escala se simuló la operación del motor con variador de frecuencia y, a la vez se realizó la maniobra de sincronía entre las dos fuentes. Es importante destacar que, dicha maniobra no pretende conectar las dos fuentes en paralelo, sino tiene como propósito utilizar el variador de frecuencia como arrancador del motor y, así, reducir la corriente de arranque, al mismo tiempo, se eliminan los riesgos de daños mecánicos en los reductores que podrían ser ocasionados por un arranque directo.

La inversión del proyecto, como se puede observar en el estudio económico, muestra que con el reemplazo de las turbinas por motores, se obtiene un excedente de energía que puede ser entregada a la empresa de distribución de la misma.

OBJETIVOS

- **GENERAL**

1. Evaluar la posibilidad de sustituir turbinas de vapor por motores eléctricos de inducción en los molinos de caña de un ingenio, para lograr el ahorro de consumo de vapor y sea empleado para incrementar la cogeneración eléctrica.

- **ESPECIFICOS**

1. Evaluar el costo-beneficio obtenido del ahorro de vapor del área de molinos de caña de azúcar y su utilización en el área de cogeneración.
2. Demostrar con el cambio de sistema de turbinas de vapor a un sistema de motores eléctricos de inducción, gobernados por variadores de frecuencia, un ahorro en el proceso de producción de azúcar.
3. Implementar la utilización de un equipo más seguro y confiable la operación.

INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía eléctrica en la industria, actualmente, es la palabra clave a nivel mundial. La confluencia de los beneficios económicos con la preservación del medio ambiente es una tendencia atractiva para muchas empresas. Por ejemplo, los residuos de la producción que se queman, sirven para alimentar las calderas, cuyo vapor se utiliza, cada vez en mayor medida, para generar energía eléctrica. El sector azucarero está dedicando, cada vez más, esfuerzos en obtener mayor eficiencia en el ciclo térmico del proceso productivo con crecientes inversiones en calderas de mayor presión y turbogeneradores de mayor potencia con el objetivo, no solo de cubrir el consumo propio de la planta sino, que, a suministrar el excedente hacia las empresas concesionarias de la distribución de la energía eléctrica, la llamada así: generación eléctrica, a través de la Biomasa, o sea, el bagazo de la caña de azúcar.

El mayor consumo de energía de un ingenio azucarero está concentrado en el área de preparación y molienda de la caña. Sin duda, que un incremento en el rendimiento de esta etapa del proceso traerá como principal beneficio una reducción del consumo de combustible, bagazo de caña, en las calderas y, además, un mayor potencial energético para ser suministrado a la empresa de distribución de la energía eléctrica. Una manera de aumentar la eficiencia en el área de molienda del ingenio Santa Ana es el reemplazo de las actuales turbinas de vapor por motores eléctricos accionados por variador de frecuencia.

Entre las principales ventajas, cabe mencionar la automatización del control del flujo de jugo a la fábrica debido al mejor ajuste de velocidad en el molino, lo cual a su vez, elimina la variación en la extracción del mismo, ya que, el accionamiento no depende de la presión de vapor. De acuerdo con los

cálculos mostrados más adelante, al reemplazar las cinco turbinas que operan, actualmente, se tiene un excedente de energía de 4,800 Kwh durante la época de zafra, la cual se puede suministrar al servicio público.

Adicionalmente, entre otras ventajas puede mencionarse la operación del molino con baja velocidad de rotación y par constante. En caso de rotor bloqueado o atascamiento del molino, se puede invertir rápidamente el sentido de rotación para liberar la carga y la ventaja más importante, la cual se demuestra en el transcurso de la evaluación del proyecto es la recuperación asegurada de la inversión.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Turbinas de vapor

Las turbinas son máquinas de flujo permanente, en las cuales el vapor entra por las toberas y se expande hasta una presión más pequeña. Al hacerlo el chorro de vapor adquiere una gran velocidad. Parte de la energía cinética de este chorro es cedida a los álabes de la turbina, convirtiéndola en trabajo útil de la misma manera que un chorro de agua cede energía a los cangilones de una rueda hidráulica.

Las turbinas de vapor pueden accionar diversos equipos, estas máquinas han establecido su gran utilidad como motores primarios, y se fabrican en muchas formas y distribuciones diferentes. Se emplean para accionar muchos diferentes tipos de aparatos, por ejemplo, generadores eléctricos, bombas, compresores y para impulsar hélices de barcos, a través de mecanismos adecuados.

La clasificación de las turbinas se efectúa desde distintos puntos de vista, según:

- Las condiciones de suministro y escape de vapor, por ejemplo, con condensación, sin condensación, con extracción automática, con presiones mixtas, con extracción regenerativa, con recalentamiento.
- La disposición de las carcacas o de los árboles, por ejemplo, de una sola carcaca, compound en tándem y en línea.
- El número de etapas de escape en paralelo, en cuanto al flujo del vapor, por ejemplo de flujo doble, triple, de seis flujos.
- El diseño de las etapas de expansión, acción o reacción

- La dirección del flujo del vapor dentro de la turbina, pueden ser de flujo radial, axial o tangencial.

Pero la distinción principal en la clasificación de las turbinas es, según los detalles en el diseño de las etapas de expansión, como lo son las de acción y las de reacción.

Estas son las dos formas básicas de las turbinas pero las turbinas modernas son una combinación de los dos principios. Casi todas las turbinas usan el principio de acción o impulsos para el primero o dos primeros pasos, con objeto de reducir las pérdidas alrededor de las terminales de los álabes o paletas y permitir que el volumen del vapor se incremente.

1.1.1 Turbinas del tipo de impulso o acción

El fundamento de una turbina de impulso es que un chorro de vapor proveniente de una tobera fija produzca un empuje en los álabes del rotor y los impulse hacia delante. La velocidad del vapor es de alrededor del doble de la velocidad de los álabes. Solamente las que utilizan toberas fijas se clasifican como turbinas de impulso. En las turbinas del tipo acción, la caída total de presión en ellas se toma a través de las toberas o elemento estacionario lo que hace entonces que el flujo que pasa por los cangilones o álabes del rotor, sea sustancialmente a presión estática constante. En la figura No. 1.0 se muestra el funcionamiento de una turbina de reacción.

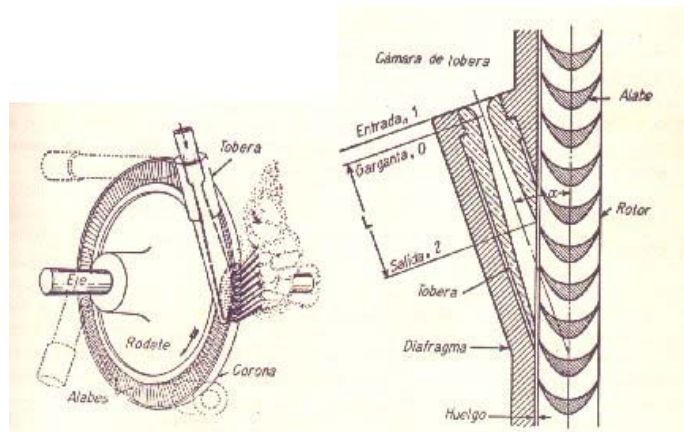


Fig.1.0 Esquema de una turbina del tipo acción

Una turbina de reacción utiliza un chorro de vapor que fluye de una tobera sobre el rotor. Realmente el vapor es dirigido hacia los álabes en movimiento por medio de álabes fijos diseñados para expandir el vapor. El resultado es un pequeño incremento en la velocidad sobre la de los álabes en movimiento. Estos álabes constituyen un muro de toberas móviles que expanden aún más el vapor.

El flujo de vapor es parcialmente invertido por los álabes en movimiento, lo que produce una reacción sobre los mismos. Puesto que la caída de presión es pequeña a través de cada hilera de toberas (álabes fijos), la velocidad es comparativamente baja. Así que se necesitan más hileras de álabes móviles que en una turbina de impulso. En la etapa del tipo de reacción, la caída total de presión asignada a la etapa se divide por igual entre los álabes fijos y los del rotor. En la figura No. 1.1 se muestra la diferencia de funcionamiento entre la turbina de reacción y la de acción.

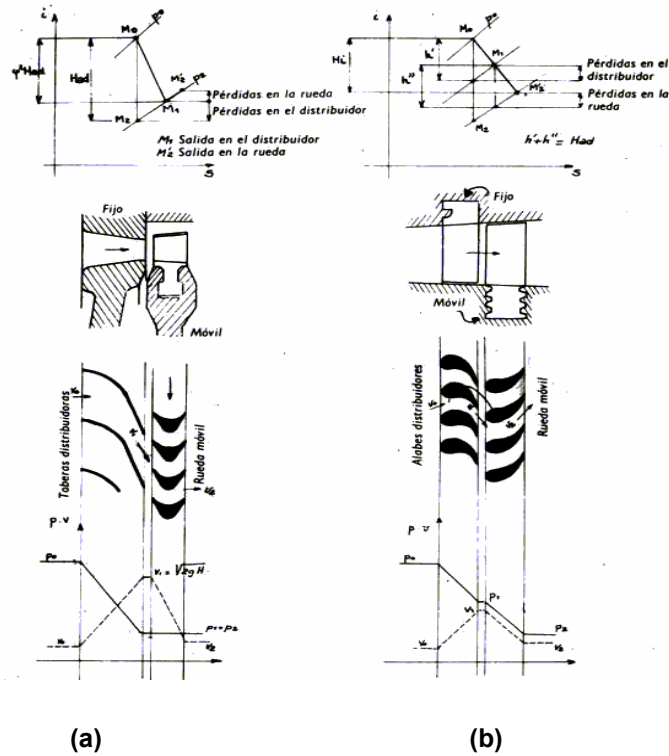


Fig. No. 1.1 a) Turbina de acción, b) Turbina de reacción

1.1.2 Otros tipos de turbinas

En las plantas se utilizan generalmente las turbinas de condensación o sin condensación. Las turbinas de vapor con condensación tienen una presión de salida inferior a la atmosférica, mientras que las unidades sin condensación escapan a una presión igual o superior a la atmosférica. Cuando el vapor se expande a una presión menor que la atmosférica en una turbina de vapor con condensación, su temperatura suele reducirse a menos de 54 °C. En general, esa energía de baja temperatura no es útil y se clasifica normalmente como calor de desperdicio. Por otro lado, el vapor de escape de las turbinas sin condensación tiene mayor temperatura y presión y puede resultar útil en

muchos procesos industriales o usarse para calefacción. En la figura No. 1.2 se muestra una turbina del tipo de condensación.

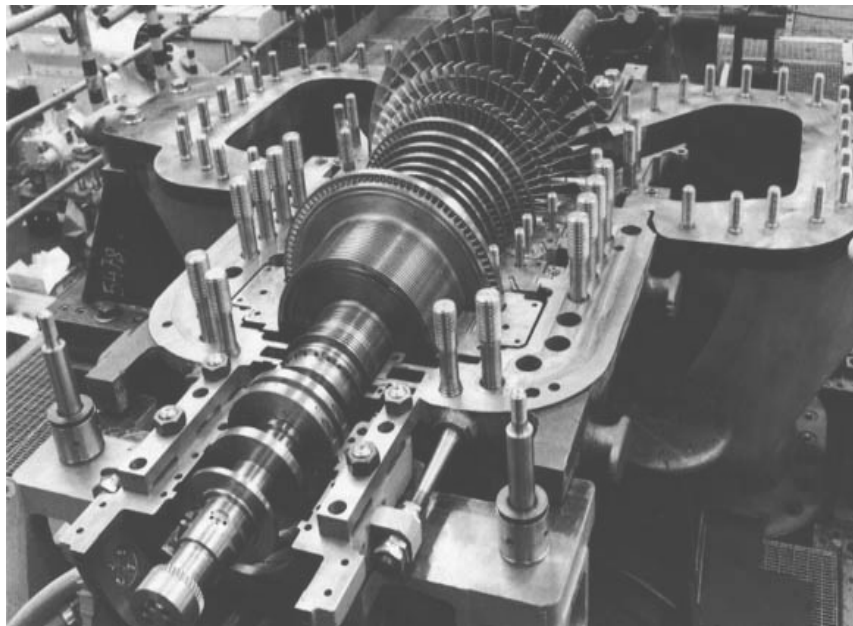


Fig. No 1.2 Turbina con condensación

1.1.3 Rendimiento de las turbinas de vapor

La turbina de vapor constituye la porción de expansión de un ciclo de vapor, el cual requiere de dispositivos separados, incluye una caldera, la turbina, un condensador y una bomba para alimentación de agua para completar el ciclo. Este ciclo de vapor para las plantas generadoras con vapor, recibe el nombre de ciclo de Rankine (ver figura No. 1.3)

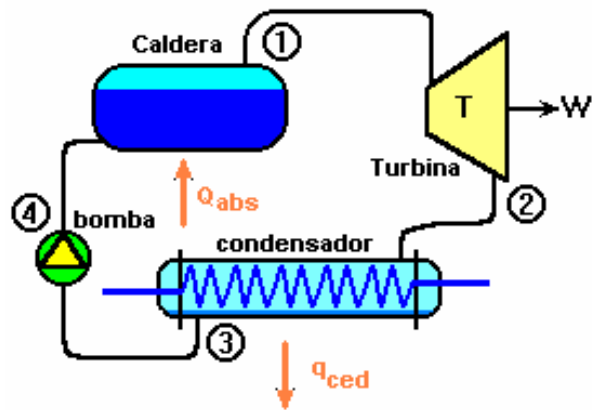


Figura 1.3 Ciclo de Rankine

El trabajo del ciclo es igual a $h_1 - h_2$ menos el pequeño trabajo de la bomba $h_4 - h_3 = v_3 (P_4 - P_3) / J$ que se requiere, y el calor que se agrega al ciclo es igual a $h_1 - h_4$. Por lo tanto:

$$\text{Eficiencia de Rankine} = \frac{(h_1 - h_2) - \frac{v_3(P_4 - P_3)}{J}}{h_1 - h_4}$$

En las industrias de proceso, como la del azúcar, se utilizan grandes cantidades de vapor. Se puede generar energía como subproducto en cantidad considerable elevando la presión en la caldera por encima de la presión de proceso y expandiendo el vapor en una turbina sin condensación antes de descargarlo al proceso. En este ciclo no hay rechazo alguno de calor porque el vapor de descarga o escape se aprovecha para el proceso y la eficiencia del ciclo termodinámico de esta energía solo se ve afectada por la eficiencia de la caldera, pérdidas auxiliares que deben de cargarse a la generación de energía

(en su mayoría trabajo extra de la bomba de alimentación de la caldera), y las pérdidas mecánicas y eléctricas de la turbina y el generador.

El consumo de calor de la estación de una planta de esta naturaleza, generadora de energía como subproducto, varía de 3900 a 4500 Btu/Kwh., dependiendo del tamaño de la planta y de la eficiencia de la caldera y son eficiencias normales del ciclo de 80 a 85%. Este consumo de calor varía muy poco con la eficiencia de la turbina porque la energía que no se usa para generación de potencia se utiliza para el proceso. Sin embargo, es necesario definir los kilowatts generados por unidad de calor a proceso a fin de evaluar la influencia de la eficiencia de la turbina o de las condiciones iniciales del vapor seleccionadas. Generalmente, se proporcionan índices de vapor garantizados para evaluar la eficiencia porque pueden compararse directamente con el índice de vapor teórico (TSR).

1.1.4 Eficiencia de máquina

El consumo de calor de la planta se utiliza para medir el rendimiento de la planta de energía, pero es de poca utilidad para evaluar las piezas del equipo específicas del ciclo. La eficiencia de la máquina de la turbina de vapor define su rendimiento real respecto al rendimiento ideal. El trabajo del ciclo de Rankine de la turbina se obtiene en forma más conveniente por medio del diagrama de Mollier (ver figura No. 1.4) De donde:

$$\Delta W = h_1 - h_2$$

1.1.5 Consumo de vapor

El consumo de vapor teórico (TSR) en lb/Kwh. para el trabajo del ciclo de Rankine se expresa como:

$$TSR = \frac{3412.14}{h_1 - h_2}$$

y el consumo real de vapor, como:

$$ASR = \frac{TSR}{\eta_{maquina}}$$

El consumo real de vapor esta dado también por

$$ASR = \frac{3412.14}{\eta_t(h_1 - h_2)}$$

en donde η_t es la eficiencia de la máquina, de la turbina sola, incluyendo las pérdidas mecánicas.

El consumo de vapor de una turbina, también se puede calcular con ayuda del diagrama de Mollier (Figura No. 1.4), las condiciones del vapor y la eficiencia de la turbina.

Para calcular el gasto teórico de vapor, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{TSR} = \frac{2457}{h_1 - h_2} \text{ lb/hp h}$$

1.2 Turbogeneradores

El generador eléctrico es la parte más importante del equipo en una termoeléctrica ya que es el que genera energía eléctrica a partir de energía mecánica, el cual es el objetivo que se quiere conseguir cuando la planta es construida.

Existen tres tipos de generadores eléctricos rotatorios: Sincrónicos de corriente alterna (CA), inducción de CA y rotatorios de corriente directa (CD). Los generadores sincrónicos son los de mayor uso debido a su sistema de excitación, en cambio, los generadores de CD han sido reemplazados casi por completo por rectificadores estáticos de silicio.

1.2.1 Generadores sincrónicos

El principio fundamental de operación de los generadores sincrónicos, es que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético induce un voltaje en el conductor. Una fuente externa de energía CD o excitador se aplica a través de unos anillos colectores en el rotor: La fuerza del flujo, y por lo tanto, el voltaje inducido en la armadura se regulan mediante la corriente directa y el voltaje suministrado al campo. La corriente alterna se produce en la armadura debido a la inversión del campo magnético a medida que los polos norte y sur pasan por los conductores individuales.

La disposición más común es la de un electroimán cilíndrico que gira dentro de un conjunto de conductores estacionarios. En las siguientes figuras se muestran tanto al electroimán o también llamado campo y los conductores que constituyen la armadura.

La corriente que se genera mediante los alternadores descritos más arriba, aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero varias veces por segundo, dependiendo de la frecuencia para la que esté diseñada la máquina. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas, montadas a 90° una de otra, y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente, una de las cuales estará en su máximo cuando la otra sea cero. Este tipo de corriente se denomina corriente alterna bifásica.

Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de 120° , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica. Se puede obtener un número mayor de fases incrementando el número de bobinas en la armadura, pero en la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo la corriente alterna trifásica, con el alternador trifásico, que es la máquina dinamoeléctrica que se emplea normalmente para generar potencia eléctrica.

Los generadores de corriente alterna de baja velocidad se fabrican con hasta 100 polos, para mejorar su eficiencia y para lograr con más facilidad la frecuencia deseada. Los alternadores accionados por turbinas de alta velocidad, sin embargo, son a menudo máquinas de dos polos. La frecuencia de la corriente que suministra un generador de corriente alterna es igual a la

mitad del producto del número de polos y el número de revoluciones por segundo de la armadura.

Los generadores sincrónicos también tienen su propia clasificación la cual es por el sistema de excitación y por su sistema de enfriamiento.

1.2.2 Generadores enfriados por aire:

Estos generadores se dividen en dos tipos básicos: abiertos ventilados (OV, open ventilated) y completamente cerrados enfriados por agua a aire (TEWC, totally enclosed water to air cooled).

Los generadores de tipo OV fueron los primeros construidos y que en algunas plantas de tamaño pequeño se utilizan. El aire en este tipo de generadores pasa sólo una vez por el sistema y considerable cantidad de materias extrañas que pueden acumularse en las bobinas, interfiriendo la transferencia de calor y afectando adversamente al aislamiento. Se pueden usar filtros que puedan reemplazarse o limpiar, para mantener limpios los embobinados. En la siguiente figura se muestra un corte de un generador OV y el patrón de ventilación.

Los generadores tipo TEWC (Figura 1.5), son un sistema de enfriamiento cerrado, donde el aire recircula constantemente y se enfría pasando a través del tubo del enfriador, dentro de los cuales se hace pasar agua de circulación. La suciedad y materias extrañas no existen en el sistema, y puesto que se tiene agua de enfriamiento disponible, la temperatura del aire puede mantenerse tan baja como se desee.

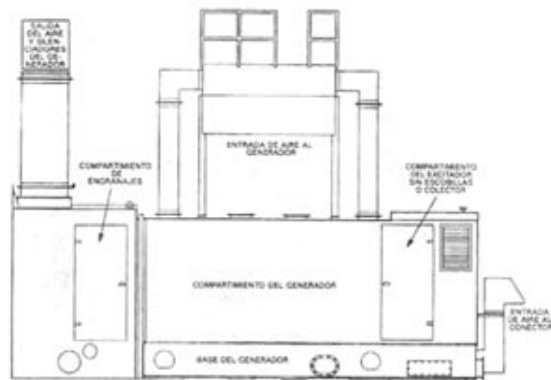


Figura 1.5 Generador Eléctrico tipo TEWC

1.2.3 Generadores enfriados por hidrógeno:

Los generadores de mayor capacidad, peso, tamaño y los más modernos, usan hidrógeno para enfriamiento en vez de aire en circuito de enfriamiento cerrado. El peso del hidrógeno es aproximadamente 1/16 del aire y con una alta capacidad térmica, esto significa, que las pérdidas de viento, se reducen por su uso y el calor removido y transferido a los enfriadores es satisfactorio. Cuando el hidrógeno se mezcla con el oxígeno en proporciones de 20 a 85% en total, la mezcla es explosiva, y se debe tener ciertas precauciones para evitar una avería.

El enfriamiento convencional con hidrógeno puede usarse en generadores con capacidad nominal aproximada de 300 MVA o menos, mucho mayor a los generadores enfriados por agua (cuya construcción es mucho más compleja) que llegan a un máximo de 250 MVA.

Generalmente los generadores se construyen con sistema de enfriamiento por hidrógeno cuando son unidades con capacidades de 100 MVA o más (Figura 1.6)

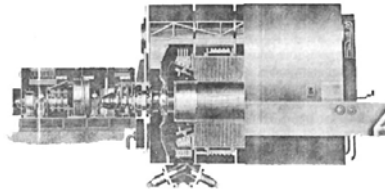


Figura 1.6 Generador Enfriado por Hidrógeno

1.2.4 Generadores enfriados por hidrógeno / agua

Pueden lograrse diseños de generadores aun más compactos mediante el uso de enfriamiento con agua directo al devanado de la armadura del generador (Figura 1.7). Estos diseños emplean torones de cobre a través de los cuales fluye agua desionizada. El agua de enfriamiento se suministra vía un circuito cerrado.

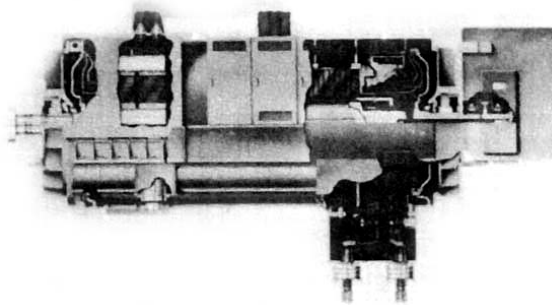


Figura 1.7 Generador Enfriado por hidrógeno / Agua

El voltaje y la corriente de armadura de los generadores enfriados por hidrógeno / agua son bastantes mayores que los enfriados por aire o hidrógeno. Como resultado unidades de mayor capacidad tanto en los voltajes como en las fuerzas que experimentan las unidades generadoras

1.3 Motores eléctricos

Un motor de inducción es sencillamente un transformador eléctrico cuyo circuito magnético esta separado por un entrehierro en dos posiciones con movimiento relativo, una que lleva el devanado primario y la otra, el secundario. La corriente alterna que se alimenta al devanado primario desde un sistema de energía eléctrica induce una corriente en oposición en el devanado secundario, cuando este último se pone en cortocircuito o se cierra a través de una impedancia externa. El movimiento relativo se produce por las fuerzas electromagnéticas correspondientes a la energía transferida de esta manera a través del entrehierro por la inducción. La característica esencial que distingue a la maquina de inducción de los otros tipos de motores eléctricos es que las corrientes secundarias se crean únicamente por la inducción, como en un transformador, en lugar de ser alimentadas por un excitador de CD o alguna otra fuente externa de energía, como en las maquinas síncronas y de CD. Los diferentes tipos de motores eléctricos se distinguen por:

- a) Su sistema de protección y método de enfriamiento
- b) Tipo de rotor y características eléctricas resultantes

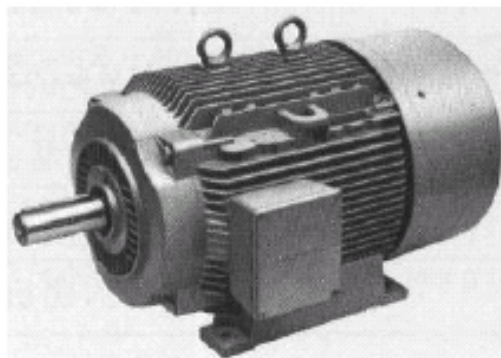


Fig. 1.8 Típico motor de inducción

1.3.1 Circuito equivalente del motor de inducción

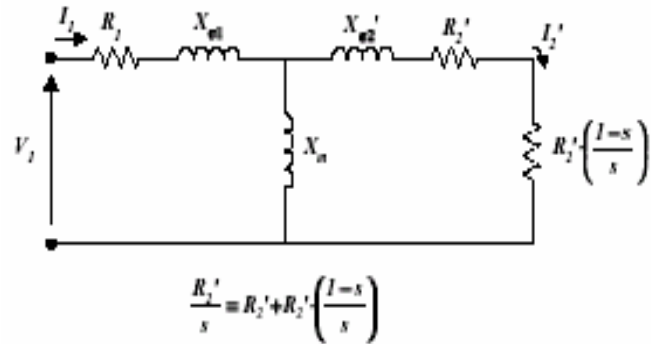


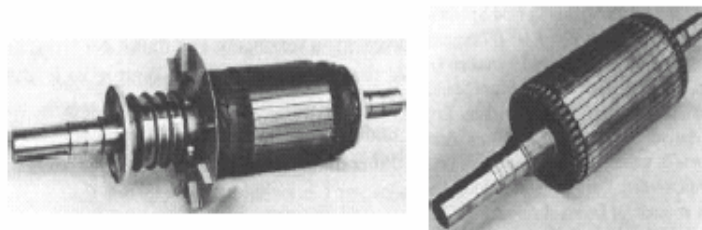
Fig. No. 1.9 Circuito equivalente del motor de inducción

1.3.2 Clasificación de los motores eléctricos de acuerdo con su sistema de protección

- Tipo abierto**, sin ningún arreglo especial
- Protegidos y semiprottegidos**, en los que el embobinado está mas o menos protegido contra golpes por la cubierta
- Semicerrado**, que tiene únicamente las aberturas necesarias para la ventilación
- Cerrado**, que está completamente cubierto y en el cual el enfriamiento de hace únicamente por persianas de hierro fundido y ventilación forzada.
- A prueba de explosión**, que son los utilizados principalmente en las destilerías para evitar todos los peligros de fuego que puedan producirse por chispas.

1.3.3 Clasificación de los motores eléctricos de acuerdo con sus características eléctricas

- a) **Motores síncronos**, cuya velocidad promedio de operación es exactamente proporcional a la frecuencia del sistema al cual está conectado.
- b) **Motores de inducción**, es sencillamente un transformador eléctrico cuyo circuito magnético está separado por un entrehierro en dos porciones con movimiento. La corriente alterna que circula en el embobinado del estator crea un campo de rotación n .
 - b.1) Clasificación de los motores de inducción
 - b.1.1) Jaula de ardilla
 - b.1.2) Rotor devanado



a) Rotor devanado,

b) Rotor jaula de ardilla

Figura 1.10 Tipos de rotor del motor de inducción

1.3.4 Consideraciones para aplicaciones de los motores

Se pueden diseñar los motores jaula de ardilla para tener las buenas características de arranque que resultan de alta resistencia del rotor y al mismo tiempo las características positivas de marcha normal que resultan de la baja resistencia del rotor, mediante el uso de rotores de doble jaula y de barras profundas. El motor de rotor devanado se debe usar cuando son muy severas

las necesidades en el arranque. En forma alternativa se pueden usar los controles de estado sólido.

Para cumplir con las necesidades normales de la industria, los motores trifásicos jaula de ardilla de gran caballaje se fabrican en línea con potencias normales hasta 200 hp a varias frecuencias, voltajes y velocidades. A los motores mayores se les considera en general como de propósito especial y no como propósito o aplicación general. Según la terminología establecida por NEMA, se dispone de varios diseños normales para satisfacer diversas necesidades de arranque y marcha normal. A continuación se presenta una breve descripción de las particularidades de estos diseños:

1.3.4.1 Diseño clase A: par normal de arranque, corriente normal de arranque, bajo deslizamiento.

Este diseño tiene un rotor jaula de ardilla sencilla de baja resistencia. El deslizamiento a plena carga es bajo y la eficiencia a plena carga es alta. El par máximo es en general más del 200% del par a plena carga y se presenta a un deslizamiento bajo, menor del 20%. El par de arranque a voltaje pleno varía de un 200% del par a plena carga, en los motores pequeños hasta aproximadamente 100% en los motores grandes. La alta corriente de arranque esta entre 500 y 800% de la corriente a plena carga, la cual es la principal desventaja de este diseño.

1.3.4.2 Diseño clase B: par normal de arranque, baja corriente de arranque, bajo deslizamiento.

Este diseño tiene el mismo par de arranque que el clase A con solo el 75% de la corriente de arranque. Se puede entonces usar arranque a voltaje

pleno en tamaños mayores a los de la clase A. la corriente de arranque se reduce por diseño para una reactancia de dispersión relativamente alta y el par de arranque se mantiene mediante el empleo del rotor de doble jaula o de barras profundas. La eficiencia y el deslizamiento a plena carga son buenos, aproximadamente los mismos que para el diseño clase A. sin embargo, el uso de alta reactancia disminuye un poco el factor de potencia y definitivamente baja el par máximo.

1.3.4.3 Diseño clase C: alto par de arranque, baja corriente de arranque.

Este diseño emplea un rotor de doble jaula con mayor resistencia de rotor que el diseño clase B. el resultado es un mayor par de arranque con menor corriente de arranque, pero una eficiencia normal menor y mayor deslizamiento que los diseños clases A y B. las aplicaciones típicas son para impulsar compresores y transportadores.

1.3.4.4 Diseño clase D: alto par de arranque, alto deslizamiento.

Este diseño tiene en general un rotor jaula de ardilla sencilla y alta resistencia (a menudo con barras de latón). Produce un par muy alto en el arranque con baja corriente, también de arranque, un par máximo alto entre 50 y 100% de deslizamiento y trabaja a alto deslizamiento a plena carga (7 al 11%). Sus usos principales son para impulsar cargas intermitentes que impliquen mucho trabajo de aceleración y para impulsar cargas de alto impacto como troqueladoras o cizallas.

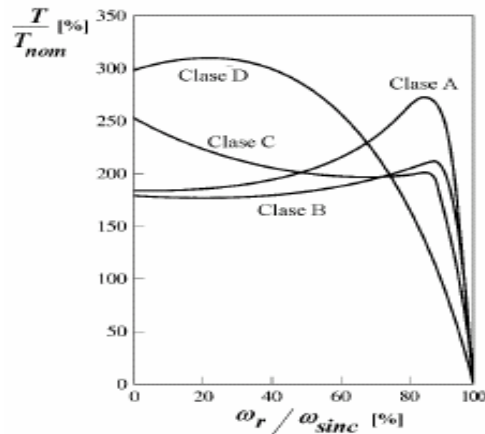


Figura 1.11 Curvas Par-Velocidad de diferentes diseños de rotor

1.4 Curvas Par – Velocidad

Esta curva característica puede dividirse de manera general en tres zonas. La primera es **la zona de deslizamiento bajo la curva**. Es esta zona, el deslizamiento del motor aumenta aproximadamente en forma lineal con el aumento de la carga; la velocidad mecánica del rotor disminuye aproximadamente en forma lineal con la carga. En esta zona de funcionamiento, la reactancia del rotor se desprecia, de tal manera que el factor de potencia del rotor es aproximadamente 1, en tanto que la corriente del rotor aumenta linealmente con el deslizamiento. Todo el límite del funcionamiento normal en estado estable de un motor de inducción está incluido en esta zona de deslizamiento lineal bajo. Por tanto, en funcionamiento normal, el motor de inducción tiene una caída lineal de velocidad.

La segunda zona en la curva del motor de inducción puede llamarse **zona de deslizamiento moderado**. Es esta región, la frecuencia es más alta que antes y la magnitud de la reactancia del rotor es del mismo orden que su resistencia. Aquí la corriente del rotor no aumenta tan rápidamente como antes

y el factor de potencia comienza a decaer. El par máximo (pico) del motor ocurre en el punto donde, con un aumento gradual de carga, el aumento en la corriente del rotor esta perfectamente balanceado por la disminución de su factor de potencia.

La tercera zona en la curva del motor de inducción se llama **zona de alto deslizamiento**. En esta zona, el par inducido disminuye realmente con el aumento de carga, puesto que el aumento en la corriente del rotor eclipsa completamente con la disminución del factor de potencia del rotor.

Para un motor de inducción típico, el par máximo en la curva, será de 200 a 250% del par nominal a plena carga en la maquina y el par de arranque será de 150% o similar al par a plena carga. A diferencia de un motor síncrono, el motor de inducción puede arrancar con la carga total sobre su eje.

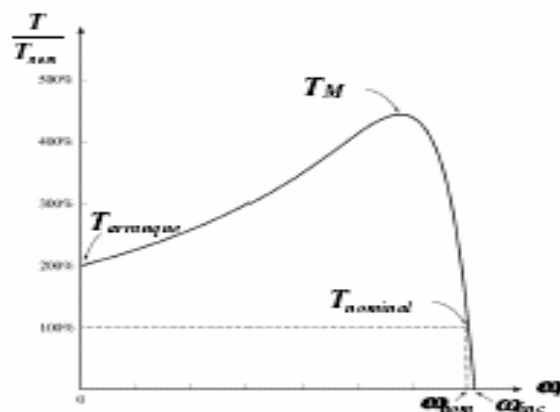


Figura 1.12 Curva Par Velocidad de un motor eléctrico

1.4.1 Par inducido en el motor de inducción

Es posible utilizar el circuito equivalente para el motor de inducción para deducir una expresión general del par inducido en función de la velocidad. El par inducido en un motor se expresa por medio de las siguientes ecuaciones:

Potencia total transferida a través del entrehierro.

$$P_{g1} = m(I_2)^2 \frac{R_2}{s} \quad (1)$$

Pérdidas en el cobre del rotor:

$$P_{cur} = m (I_2)^2 R_2 \quad (2)$$

Para la potencia desarrollada en el eje del motor se tiene:

$$P = P_{g1} - P_{cur}$$

$$P = m(I_2)^2 \frac{R_2}{s} - m (I_2)^2 R_2 \quad (3)$$

$$P = m (I_2)^2 R_2 \frac{1-s}{s}$$

$$P = (1-s) P_{g1}$$

Recordando que

$$P = \omega T$$

Cuando $\omega = \omega_s$ se tiene:

$$P = (1-s) \omega_s T \quad (4)$$

Entonces, con T en N-m y la ecuación (3) se tiene:

$$T = \frac{1}{\omega s} (m(I_2)^2 \frac{R_2}{s} - m(I_2)^2 R_2)$$
$$T = \frac{1}{\omega s} m(I_2)^2 \frac{R_2}{s} \quad (5)$$

1.5 Tipos de arranque de los motores de inducción

El proceso de arranque de un motor eléctrico de inducción comprende la elección de un término medio entre las necesidades y el costo. Es obvio que los requisitos primarios del arrancador son que el par de arranque del motor sea el adecuado para arrancar la carga en las peores condiciones de voltaje de línea y de carga; también que la corriente de línea no sobrepase los límites establecidos por la compañía de servicio eléctrico o la caída de voltaje de una planta.

Los requisitos secundarios en la selección del arrancador incluyen la suavidad de la aceleración, el mantenimiento, el factor de potencia, la confiabilidad y la eficiencia. La selección de un arrancador de transición cerrada depende de si el motor y la línea de alimentación pueden soportar la corriente pico durante el tiempo que el arrancador transfiere el motor a pleno voltaje.

1.5.1 Arrancadores de corriente alterna entre los lados de la línea

Estos arrancadores tienen una construcción sencilla, son fáciles de instalar, mantener y no son caros. Un arrancador típico consta de un contactor de tres polos, con un relevador térmico de sobrecarga para la

protección del motor. El arrancador conecta al motor directamente a la línea, con lo que se aplica todo el voltaje a las terminales del motor. Este arrancador es en particular adecuado para los motores de jaula de ardilla. Como estos arrancadores conectan en forma directa el motor a las líneas de alimentación, el motor tomara una corriente de irrupción de 6 a 10 veces la nominal. En la mayoría de las instalaciones, esto no es objetable y no dañara al motor o a la maquinaria impulsada. Cuando se necesita que la irrupción de arranque sea menor, se debe utilizar otras formas de arranque con voltaje reducido.

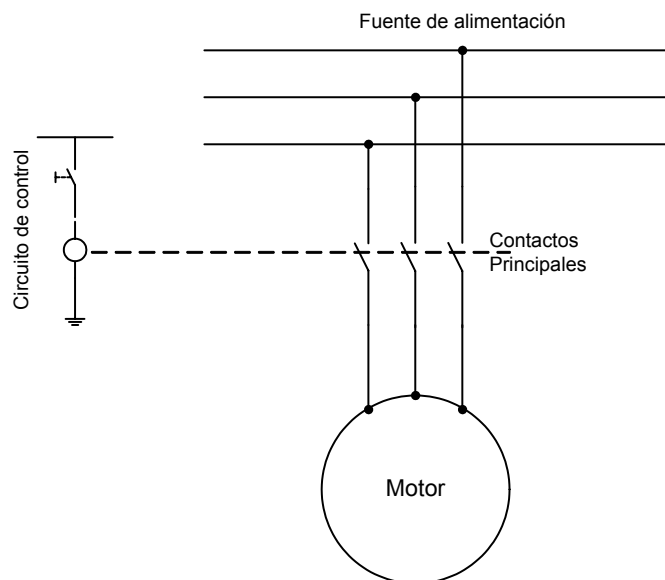


Figura 1.13 Arranque directo de motor desde la fuente de alimentación

1.5.2 Auto transformadores de arranque

Estos tienen dos auto transformadores conectados en delta abierta para dar lugar a un arranque con voltaje reducido. Se proporcionan tres tomas, con lo que se obtiene 50, 65 y 80% del voltaje total de la línea. La corriente del motor varía en forma directa con el voltaje aplicado a sus terminales. La corriente de línea varia proporcional al cuadrado del voltaje aplicado, por lo

tanto, es menor que con los arrancadores del tipo resistor. El par también varía de acuerdo con el cuadrado del voltaje aplicado. Por lo tanto la toma 50% del voltaje dará lugar a un par de arranque de 25%. Se tienen que hacer las conexiones a la toma mas baja que dé el par de arranque requerido.

Las características de este tipo de arrancado son baja corriente de línea, potencia baja de línea y un bajo factor de potencia.

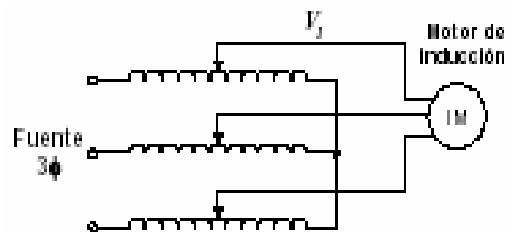


Figura 1.14 Autotransformador de arranque

1.5.3 Arrancadores de resistor primario

Este tipo de arrancadores conectan el motor a la línea a través de un resistor en serie. Se obtiene un voltaje reducido en el motor, en virtud de la caída de voltaje a través del resistor. Conforme el motor se acelera, disminuye la corriente tomada de la línea y en consecuencia, disminuye la caída de voltaje a través del resistor y aumenta el voltaje en las terminales del motor. Por consiguiente el par entregado por el motor aumenta en forma constante, conforme se incrementa la velocidad de este. Después de un intervalo definido, un dispositivo contador de tiempo, que hace funcionar el contactor principal, energiza el contactor de aceleración, el cual pone en cortocircuito al resistor.

No existe periodo de transferencia durante el cual el motor pueda perder velocidad y como consecuencia, se obtiene una aceleración suave. En

comparación con el auto transformador, el arrancador de resistor primario toma más energía de la línea en el arranque, pero da lugar a una aceleración más suave, una aceleración más rápida con un par inicial dado y un factor de potencia más alto. En los tamaños pequeños, el arrancador de resistor primario cuesta menos que el auto transformador.

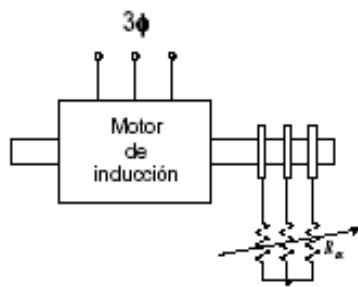


Figura 1.15 Arranque por resistores

1.5.4 Arrancadores estrella delta

Este tipo de arrancadores son una forma de arrancador con voltaje reducido que se usa con motores de seis terminales, en los que se aplica el 57% del voltaje a los devanados en el primer paso y todo el voltaje en el segundo paso. La corriente de arranque y el par de arranque son el 33% de los valores a pleno voltaje. El arrancador en Y- Δ se usa para compresores y otras cargas que se puedan descargar para el arranque o que puedan tolerar el 33% del par de arranque. El arrancador Y- Δ opera de la siguiente manera:

Se energiza el contactor de relevador S, con lo que se conectan los devanados del motor en Y. se cierra un contacto auxiliar normalmente abierto que está en el contactor S, con lo que se energiza el contactor 1M. Sus contactos se cierran y se energizan los devanados del motor en Y. Después de un intervalo predeterminado, se desenergiza el contactor, se abren los contactos en el contactor de tiempo TR, con lo que se desenergiza el contactor S, se abren sus

contactos y en consecuencia se abre el devanado conectado en Y. El motor queda temporalmente desenergizado. Se cierra un contacto auxiliar normalmente abierto que esta en el contactor S y se energiza el contactor 2M, además del 1M. El motor se vuelve a energizar ahora en Δ a pleno voltaje.

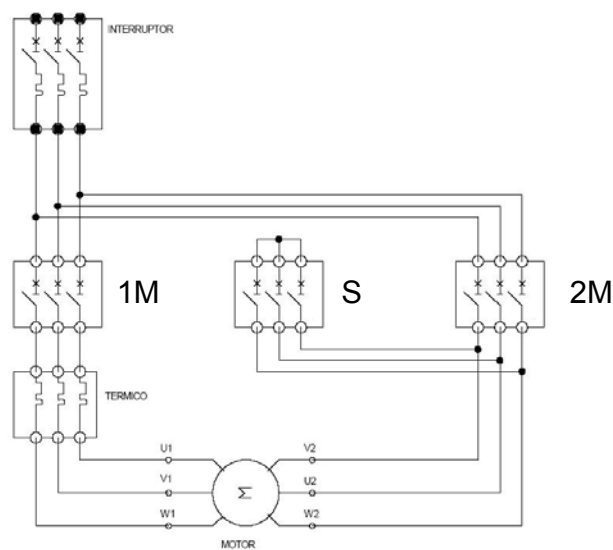


Figura 1.16 Diagrama arranque estrella delta

1.5.5 Arrancadores de estado sólido

En estos arrancadores se emplean tiristores en oposición, controlados por la fase, en dos o tres líneas que van hacia el motor, como se muestra en la figura. Los tiristores se controlan durante el periodo de arranque, para mantener alrededor del 300% de la corriente de línea y del motor, al aumentar en forma gradual el voltaje del motor, a partir del valor inicial. El arranque es suave; se pueden ajustar con facilidad la corriente y el par de arranque. El arrancador de estado sólido se aplica en casos en que la corriente de línea es crítica y en los

que el arranque repetitivo del motor limita la duración de los contactores electromagnéticos.

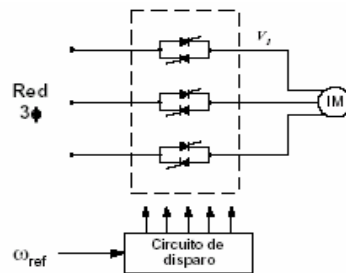


Figura 1.17 Arrancador de estado sólido

1.5.6 Arrancadores para motores de CA de anillos colectores

Estos arrancadores constan de un contactor para conectar el primario del motor a las líneas de alimentación y un resistor, así como algún medio para conmutarlo, para el circuito secundario. El par de arranque depende del valor óhmico de la resistencia usada, obteniéndose el par máximo cuando se selecciona la resistencia para una irrupción de poco más o menos tres veces la corriente a plena carga. En general se utiliza una resistencia suficiente para limitar la corriente de irrupción a un 150 ó 200%. El resistor se corta paso a paso, a medida que se acelera el motor, hasta que los anillos colectores se ponen en cortocircuito. El medio de conmutación puede ser un controlador de placa frontal, un tambor o una serie de contactores magnéticos controlados por la corriente o por relevadores de tiempo. Se pueden obtener un alto par de arranque y un bajo deslizamiento en funcionamiento con un motor de anillos colectores.

1.6 Variadores de frecuencia

Los variadores o convertidores de frecuencia son sistemas eléctricos que emplean dispositivos de estado sólido para variar la frecuencia y el voltaje en la entrada del motor eléctrico de acuerdo con las necesidades de la carga.

Todos los variadores de frecuencia incluyen tres secciones entre la fuente AC y la carga. Dichas secciones se muestran en la figura 1.18.

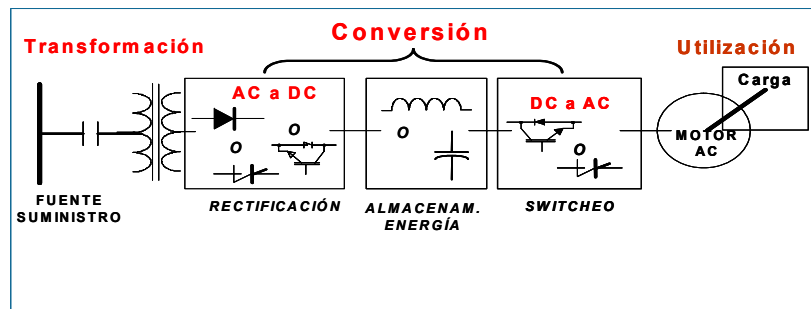


Fig. 1.18 Diagrama elemental de los variadores de frecuencia.

1. **Transformación.** los aislantes y los cambios del voltaje para uso general transformado a los niveles y a la configuración de la sección de conversión.
2. **Conversión.** Que cambia el voltaje utilizado en un voltaje ajustable, frecuencia ajustable para emparejar los requerimientos de la velocidad y del esfuerzo de torsión de la carga conectada
3. **Utilización.** Consiste en el motor eléctrico y equipo mecánico para alimentar la carga.

La rectificación o conversión de corriente alterna en continua es propia de la regulación de velocidad para motores de AC. Estos rectificadores son los componentes principales de los convertidores de frecuencia.

1.6.1 Terminología y definiciones de los variadores de frecuencia

Se designa como rectificadores a los circuitos electrónicos que convierten la potencia tomada de una red industrial de tensión alterna, prácticamente constante, transformándola en potencia sobre una red de tensión continua.

Dentro de los rectificadores se encuentran dos clases:

- **Rectificadores No controlados.** Que suministran una tensión continua de salida prácticamente constante.
- **Rectificadores Controlados.** En este tipo es posible obtener una tensión de salida, en el lado CC, regulada.

Los dispositivos convertidores que obtienen potencia en tensión alterna y además con frecuencia variable a partir de un sistema de potencia en tensión continua reciben el nombre de onduladores.

A la asociación de rectificador y ondulator se le da el nombre de inversor o convertidor de frecuencia. Es también muy frecuente designar al ondulator como inversor. Esta asociación permite obtener potencia con tensión y frecuencia variables y es el dispositivo más empleado actualmente para control de velocidad y par en accionamientos eléctricos con motores de corriente alterna. También en la designación de los rectificadores se alude a la conmutación, o fenómeno de transferencia de la corriente de una rama de semiconductores a otra. En función del comportamiento durante la conmutación distinguiremos los siguientes tipos:

- **Rectificadores de conmutación forzada.** Es el caso en el cual la tensión que hace que los semiconductores pasen al estado de bloqueo es externa al rectificador. Existen dos posibilidades:
 - a) **Conmutación forzada por la red.** Es decir, cuando esta tensión es la de la red de alimentación CA.
 - b) **Conmutación forzada por la carga.** Para el caso de que la carga, de tipo activo, proporciona esta tensión. Estamos en el caso de alimentación a un motor síncrono.

- **Rectificadores auto conmutados o de conmutación propia.** Ahora la tensión de conmutación la proporciona el propio rectificador generalmente mediante descarga de condensadores previamente cargados.

1.6.2 Semiconductores para convertidores de frecuencia

1.6.2.1 Historia del semiconductor de potencia

Los primeros rectificadores puestos en servicio en 1930 fueron los rectificadores de gas Tritón. Luego con la evolución de los dispositivos semiconductores de potencia fueron moviendo la tecnología hacia un uso más amplio.

La figura 1.19 muestra claramente el desarrollo de los semiconductores a través de la línea del tiempo.

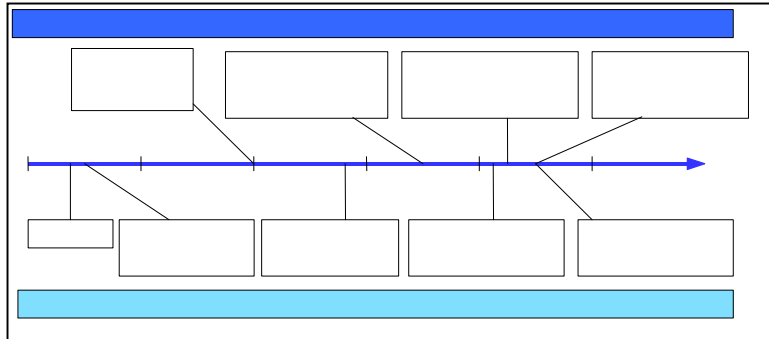


Figura 1.19 Desarrollo de los semiconductores

Así como los dispositivos de potencia han evolucionado, los diseñadores han utilizado sus características en la construcción en los variadores de frecuencia. Los semiconductores de potencia de la tabla 1.0 se basan en tres familias: diodos, tiristores y transistores de potencia.

Dispositivo	Operación	Description
Familia de Dispositivos Diodo de Silicio		
Diodo		Conduce corriente positiva
Familia de Dispositivos Tiristor		
Rectificador Controlado de Silicio (SCR)		Una pequeña señal positiva en la compuerta hace conducir la corriente, al eliminar dicha señal, el SCR deja de conducir.
Tiristor de Compuerta de apagado (GTO)		Una pequeña señal positiva en la compuerta hace conducir la corriente, una señal inversa más grande hace que deje de conducir la corriente.
Tiristor de compuerta integrada conmutada (IGCT)		Es un GTO con control electrónico integrado de compuerta. Bloquea el voltaje en una dirección.
Tiristor de Compuerta Simétrica Conmutada (SGCT)		Es un tiristor GTO similar al tiristor IGCT excepto que bloquea el voltaje en ambas direcciones.
Familia de Dispositivos Transistor		
Transistor Bipolar de Potencia (BPT)		Controla el flujo de corriente positiva con la corriente de entrada de la base
Transistor Bipolar de Compuerta Aislada (IGBT)		Un dispositivo híbrido con muy alta resistencia de entrada. La corriente de la compuerta activa el transistor
Transistor de Inyección de Compuerta Mejorada (IEGT)		Es un IGBT avanzado de alta potencia con un voltaje de estado muy bajo y menos pérdidas que el tiristor.

Tabla 1.0 Características de los semiconductores

Transistor Bipolar
De Potencia
(BPT)

1955

1965

Diodo (D)

Re
controla

1.6.2.2 Comparaciones generales en los dispositivos semiconductores

a) Diodo

Los diodos de potencia son los sucesores de los primeros dispositivos semiconductores. Tienen la característica de conducir en una sola dirección. Son utilizados como rectificadores para convertir corriente AC en DC en la sección del convertidor.

b) Tiristores

En general, los tiristores (SCR, GTO, IGCT, SGCT) necesitan de una señal de corriente en la compuerta para poder conducir y de otra señal para dejar de hacerlo. La diferencia entre cada uno de ellos es el tamaño y la duración del pulso, así como la cantidad de corriente que necesitan para activarse o desactivarse.

c) Transistores de potencia

A diferencia de los tiristores, los transistores de potencia necesitan una señal de voltaje en la compuerta para activarse o desactivarse, como lo es el transistor de efecto de campo y oxido metálico (MOSFET). El voltaje aplicado en la compuerta, crea un campo eléctrico que permite que el material semiconductor conduzca.

A principios de los 90's, se combino un transistor MOSFET con un transistor bipolar, el resultado fue un nuevo dispositivo híbrido llamado IGBT, transistor bipolar de compuerta aislada (Isolated Gate Bipolar Transistor).

Las ventajas son que la señal de control es de voltaje y no corriente, el control requiere muy poca potencia y que los circuitos de control son físicamente pequeños y tienen un bajo número de componentes, por lo que existe menos probabilidad de falla. En la actualidad, existe un diseño mejorado del IGBT, el cual se denomina IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor), el cual soporta hasta 4000 Volts y 4500 Amps, lo que lo hace un diseño para aplicaciones en variadores de mediana tensión.

1.6.3 Clasificación de los variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia pueden ser agrupados dentro de dos grandes grupos, fuente de corriente y fuente de voltaje; que no se refiere a los semiconductores que contenga.

1. **Variador con Fuente de corriente.** Un reactor tiende a mantener constante la corriente, y forma la base del variador con fuente de corriente.
2. **Variador con fuente de voltaje.** Un capacitor tiende a mantener el voltaje constante y forma la base para el variador con fuente de voltaje.

De donde el nombre del variador va de acuerdo a la fuente de corriente o voltaje con que se alimenta el motor desde la salida del convertidor.

1.6.3.1 Variador con fuente de corriente

Como se indico anteriormente, la potencia fluye a través de los semiconductores de la sección de conversión, entonces un nivel de voltaje o corriente es creado. Este nivel de DC es switcheado sucesivamente a las fases del motor.

En el variador con fuente de corriente (ver figura 1.20), el nivel de voltaje DC es variado para obtener un voltaje promedio en las terminales del motor con energía almacenada en un inductor y con la forma de corriente igual al promedio real de la corriente en los devanados del motor, el cual es proporcional al torque de la carga. El inversor sigue la frecuencia del motor y el torque es regulado para acercarse a la velocidad de referencia. En otras palabras, la corriente almacenada en el inductor es switcheada a las fases del motor para producir voltaje y corriente. El rango de cambio de la corriente, determina el rango de cambio de torque y corriente de la carga.

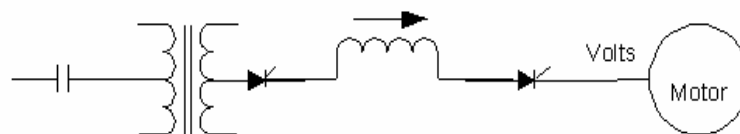


Figura 1.20 Variador con fuente de corriente

La ventaja principal es su costo más bajo que las demás topologías. Entre las principales desventajas de esta topología están el que no siempre es posible utilizarlo para velocidades muy bajas y que el factor de potencia no es constante en todo el rango de variación de velocidad.

1.6.3.2 Variador con fuente de voltaje

En el variador con fuente de voltaje (ver Figura 1.21), el nivel de voltaje DC siempre es el mismo. El voltaje del motor es variado y la corriente es controlada por la salida de los switches. En la figura se muestra cómo el voltaje de salida del motor y las corrientes son construidas desde el nivel de DC del capacitor creada por los rectificadores de la sección de entrada de la alimentación. La modulación por ancho de pulso (PWM) es el método predominante para crear esas formas de onda.

Los switches de salida conectan las fases del motor en combinaciones de más y menos para que el voltaje promedio en las terminales del motor este muy cercano al promedio de la onda senoidal.

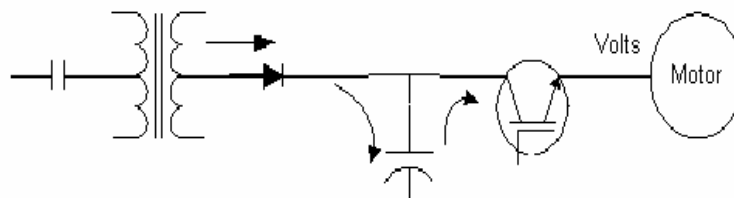


Figura 1.21 Variador con fuente de voltaje.

Otras características de esta clasificación se muestran en la siguiente tabla

Aplicación o Área	Variador con fuente de corriente	Variador con fuente de voltaje
Rectificación	Debe estar activo el control	Diodo o control activo
Voltaje DC	Varía de acuerdo a las necesidades de voltaje del motor	Bus DC
Almacenamiento de energía	Inductor - pérdida de energía	Capacitor - no hay pérdidas de energía
Corriente de Motor	Corriente promedio seteada por el convertidor de entrada	Controlada con voltaje en la salida del inversor
Voltaje en terminales de motor	Excitación determinada del motor, seteada por el convertidor de entrada	Arreglo de switches modulados de salida en el bus de voltaje
Factor de potencia en el lado de la fuente	Con SCR, varía con las RPM del motor	Siempre elevado, con pequeñas variaciones

Tabla 1.1 Comparación entre variadores con fuente de voltaje y corriente

En ambas clasificaciones, la frecuencia es variada para mantener la velocidad necesaria según los requerimientos del motor.

1.6.3.3 Variadores PWM multinivel

Las modulaciones de dos niveles son características de los motores y variadores de bajo voltaje, pero en mediano voltaje los variadores se presentan de otra forma. La magnitud mas grande de voltaje en MV es 4160 V rms y un voltaje de 5820 V pico a pico. Cada uno de los dispositivos tiristores no puede switchear este nivel de voltaje en un solo paso. El aislamiento de un motor eléctrico estándar fallaría si es sometido a uno de estos picos de voltaje.

Para evitar esto, se crean múltiples niveles con switcheo entre esos niveles. En la figura 1.22 se muestra el esquema de un variador múltiples niveles de switcheo de DC.

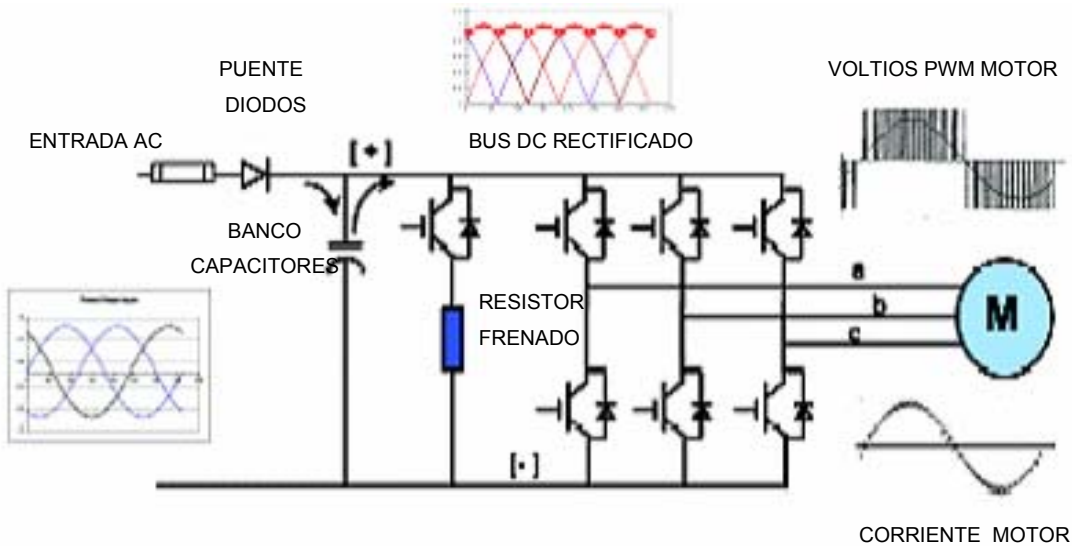


Figura 1.22 Variador Multinivel con fuente de voltaje

1.6.3.4 Niveles de salida

Los niveles de voltaje DC están relacionados con el switcheo de la forma de onda de salida. Por ejemplo, tres niveles de voltaje DC (más, cero, menos), es bueno para motores con voltajes de hasta 2400 V, en cambio 5 niveles en voltaje del bus DC es bueno para motores con voltajes desde 4160 V. en las figuras 1.23 y 1.24 se muestran ondas de voltaje para 3/5 niveles para 2400 V rms y 5/9 niveles para 4160 V rms respectivamente.

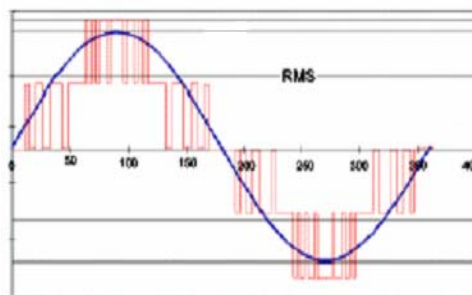


Fig. 1.23 Onda de voltaje de salida de un variador con 3 niveles de salida

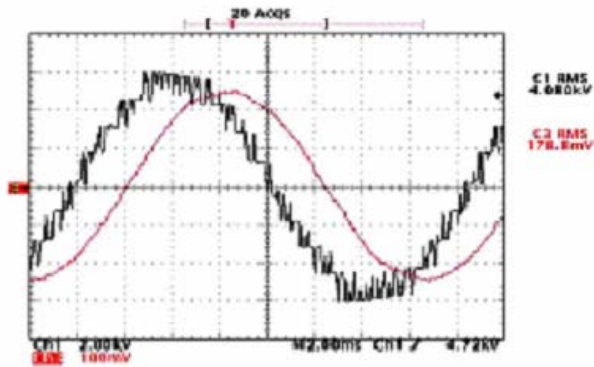


Fig. 1.24 Onda de voltaje de salida de un variador con 9 niveles de salida

1.6.4 Efectos de los armónicos de los variadores de frecuencia PWM

Las intensidades y tensiones de armónicos se crean a partir de cargas no lineales conectadas al sistema de distribución de potencia. La distorsión por armónicos es una forma de contaminación en la planta eléctrica que puede provocar problemas si la suma de intensidades de armónicos supera ciertos límites.

Todos los convertidores electrónicos de potencia empleados en distintos tipos de sistemas electrónicos pueden aumentar las perturbaciones por armónicos introduciendo intensidades de armónicos directamente hacia la red. La figura 1.25 muestra cómo los armónicos en intensidad (i_h) en la intensidad de entrada (i_s) de un convertidor electrónico de potencia afectan a la tensión de alimentación (u_t).

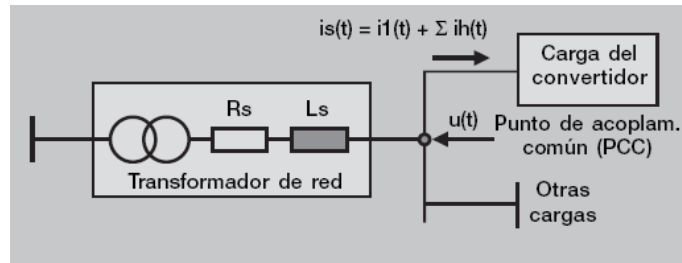


Figura 1.25 Planta con carga del convertidor, transformador de red y otras cargas.

Fuente: Guía técnica No. 6. ABB.

La reducción de armónicos puede realizarse mediante modificaciones estructurales en el sistema de accionamiento o empleando filtrado externo. Las modificaciones estructurales pueden consistir en reforzar la alimentación, en emplear un accionamiento de 12 pulsos o más, en emplear un rectificador controlado o en mejorar el filtrado interno en el convertidor. La figura 1.26 muestra los factores en el sistema de accionamiento de CA que tienen algún efecto en los armónicos. Los armónicos en intensidad dependen de la estructura del convertidor y los armónicos en tensión son los armónicos en intensidad multiplicados por las impedancias de alimentación.

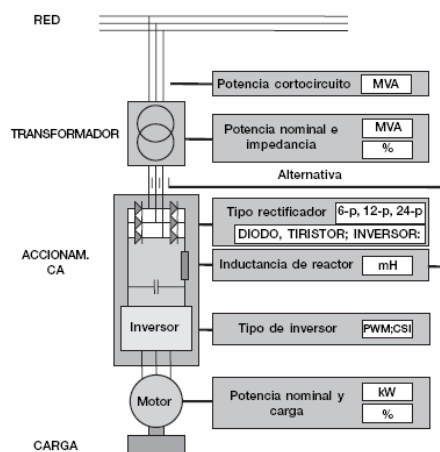


Figura 1.26 Características del sistema de accionamiento que afectan los armónicos.

Fuente : Guía No. 6. ABB

Existen varios factores que afectan a los armónicos en un sistema eléctrico. En la tabla 1.2 se describen los distintos factores y sus efectos.

Causa	Efecto
Para un motor mayor...	mayores armónicos en intensidad
Para una mayor carga del motor...	mayores armónicos en intensidad
A más inductancia de CC o CA...	menores armónicos en intensidad
Para un número mayor de pulsos en el rectificador...	menores armónicos en intensidad
Cable de alimentación más largo...	mayores armónicos en tensión
Con un transformador mayor...	menores armónicos en tensión
Menor impedancia del transformador...	menores armónicos en tensión
Para una capacidad de cortocircuito mayor de la alimentación...	menores armónicos en tensión

Tabla 1.2 Distintos factores y sus efectos

El contenido de armónicos para las distintas disposiciones de rectificadores, varía de acuerdo al número de pulsos, según se muestra en la tabla 1.3, en donde se puede observar que los variadores con rectificador de 6 pulsos aunque son los más baratos, son los que producen mayor cantidad de armónicos a la red, si no se utilizan filtros en la salida de los mismos.

RECTIFICADOR	5°	7°	11°	13°	17°	19°
6 PULSOS	30%	12%	8.90%	5.60%	4.40%	4.10%
12 PULSOS	3.60%	2.60%	7.50%	5.20%	1.70%	1.40%
24 PULSOS	4%	2.70%	1.00%	0.70%	1.40%	1.40%
IGBT ACTIVO	2.60%	3.40%	3.00%	0.10%	2.10%	2.20%

Tabla 1.3 Porcentaje de armónicos producidos de acuerdo al tipo de rectificador

2 DISEÑO DE SISTEMA MOTOR, VARIADOR DE FRECUENCIA

2.1 Antecedentes

El proceso de fabricación del azúcar de caña se inicia cuando la caña viene del campo (plantaciones de caña de azúcar), es pesada en romanas hidráulicas, luego es transportada a las plataformas de recibo y de aquí es puesta en el tablero sin fin que conduce a dos mazas provistas de cuchillas que giran alrededor de 300 a 400 rpm. Estas mazas cortan la caña en pedazos más pequeños para ser pasadas luego a otro conductor sin fin que los conduce a una batería compuesta de dos cilindros o mazas estriadas llamadas desmenuzadores, para el caso del ingenio Santa Ana este equipo es llamado molino Walker, a quien se le proporciona movimiento por medio de un motor hidráulico. La maza superior soporta una presión aproximadamente de 225 toneladas. Al pasar la caña desfibrada o machacada entre dichas mazas, se comprime y al mismo tiempo es extraído el jugo de la caña, el cual es recibido en un canal que lo lleva a un depósito provisto en su parte superior de un colador, en donde queda el bagacillo. El guarapo propiamente dicho, que se filtra es conducido junto con el bagazo que sale del primer molino y por medio de un conductor pasa al segundo molino.

El segundo molino esta constituido por tres mazas estriadas que giran a 6 rpm y la maza superior soporta 300 toneladas. El jugo que sale de aquí, sigue el mismo camino que el del primer molino, pues siempre contiene bagacillo en suspensión. El bagazo al salir del segundo molino, lleva más o menos 48% de humedad, 47% de fibra y 5% de sacarosa. Luego, dicho bagazo o fibra, es llevado al siguiente molino por medio de un conductor llamado Donelly. Este proceso se repite en cada molino hasta llegar al molino 5, en el cual, la

humedad del bagazo que sale depende de la velocidad del molino, mientras más lento gire la turbina (Aprox. 3200 rpm), menor será la humedad con la que

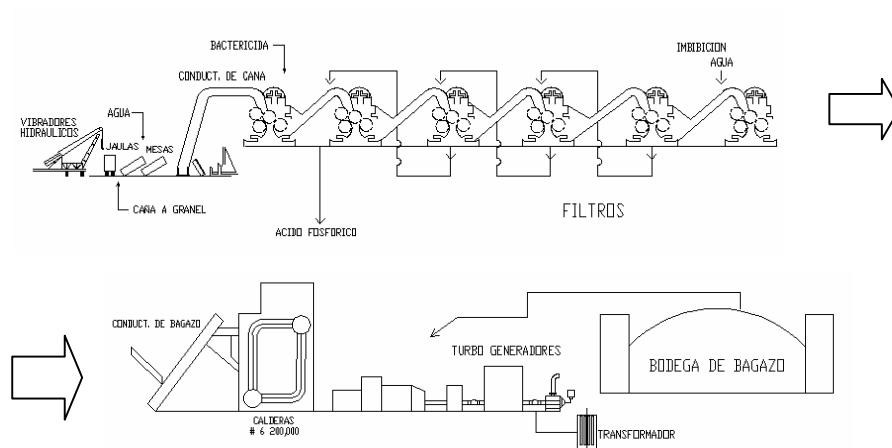


Figura 2.1 Diagrama de proceso de caña de azúcar

saldrá el bagazo hacia las calderas, en donde se utilizará como combustible. El jugo de la caña es bombeado hacia la fábrica en donde se procesa y finalmente se obtiene el azúcar.

En el proceso de extracción del jugo de la caña, el primero y quinto molino, son accionados por medio de una turbina de vapor de 900 HP, 3200 rpm y 600 psig. Del segundo molino al cuarto, están accionados por una turbina cada uno que giran a 3600 rpm. Las turbinas esta acopladas a unos reductores de alta, los cuales disminuyen la velocidad a 400 rpm y estos a su vez están acoplados a otros reductores intermedios, los cuales disminuyen la velocidad de 400 a 36 rpm. Finalmente, existen los últimos reductores que disminuyen la velocidad de 36 a 6 rpm, que es con la que trabajan los molinos. (Ver figura 2.2).

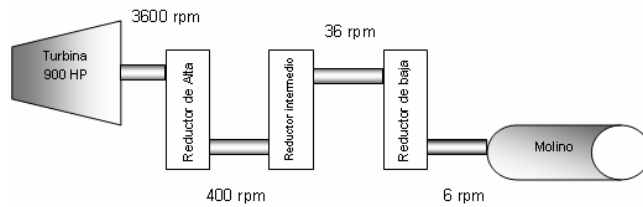


Figura 2.2 Configuración actual molino

Para generar el vapor con el que se alimenta a las turbinas, es necesaria una caldera de 200,000 lb. vapor por hora a una presión de 600 psi. Dicha caldera utiliza como combustible el bagazo que sale del último molino. Esta caldera también alimenta a un turbogenerador de 15 MW al mismo tiempo. Ver figura 2.3

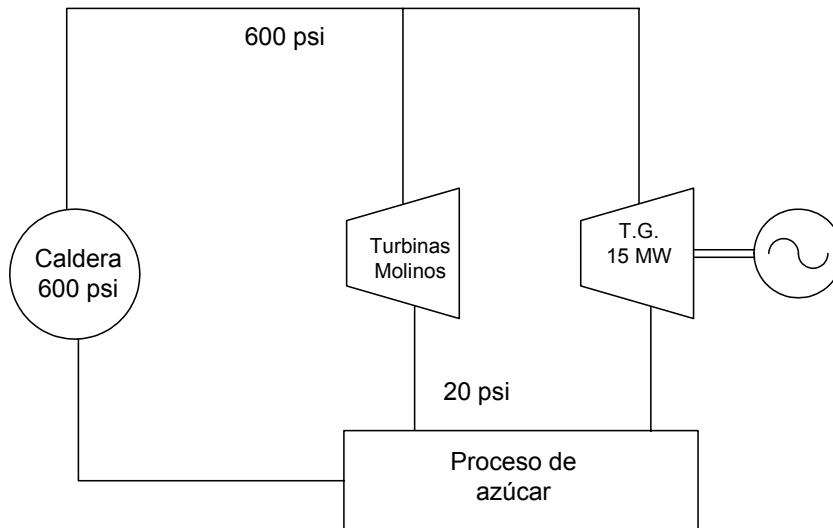


Figura 2.3 Circuito de vapor

Cuando el vapor pasa a través de las turbinas, se expandiona y sale con una presión de 20 psi, la cual es utilizada para todo el proceso del azúcar. Actualmente, en el ingenio Santa Ana, la disposición de las turbinas de vapor para los molinos y para un generador de 15 MW se encuentra como en la figura 2.3, en donde el generador trabaja aproximadamente al 50% de su capacidad debido a que la capacidad de la caldera no es suficiente para alimentar los dos circuitos.

2.2 Propuesta

Es posible aumentar la generación del turbogenerador si se disminuye el consumo de vapor en las turbinas del área de molinos del ingenio. Para reducir dicho consumo de vapor es necesario reemplazar las turbinas actuales por motores eléctricos de inducción. El reemplazo total de las turbinas se reflejará en el aumento de generación eléctrica en el generador. En la figura 2.4 se muestra la sustitución de la turbina por el motor eléctrico.

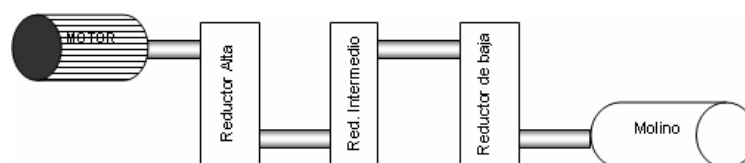


Figura 2.4 Sustitución de turbina por motor eléctrico

En dicha sustitución, el ahorro de vapor obtenido es pasado a través del generador para aumentar su generación al 100%. El circuito de vapor final es mostrado en la figura 2.5

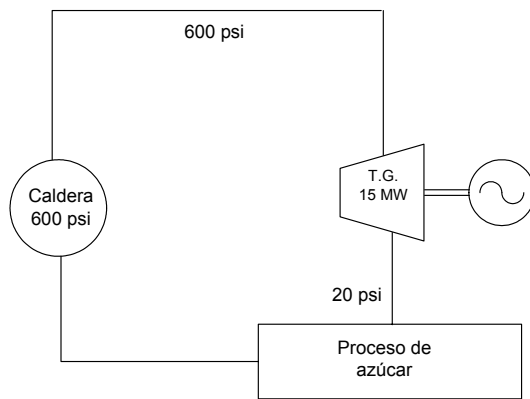


Figura 2.5 Circuito de vapor final

El diagrama unifilar para la conexión de los motores que sustituirán a las turbinas de vapor se muestra a continuación en la figura 2.6

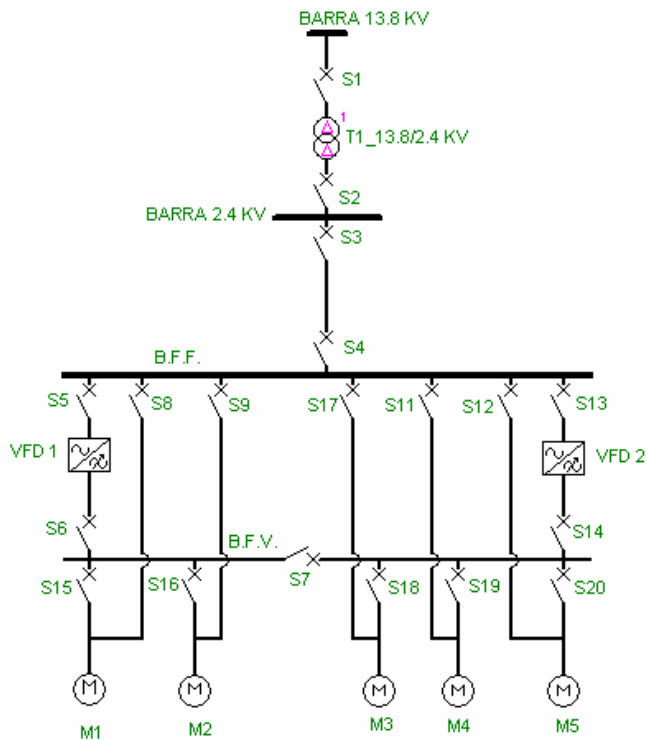


Figura 2.6 Diagrama unifilar de la conexión de motores en el área de molinos

Y opera de la siguiente forma:

Teniendo cerrados los interruptores desde S1 hasta S4, se energiza la barra de frecuencia fija BFF. Para iniciar el arranque de los motores, primero se cierran los interruptores S5 y S13 para alimentar los variadores de frecuencia VFD 1 y 2. Seguidamente se procede a cerrar los interruptores S6 y S7 para la respectiva alimentación de la barra partida de frecuencia variable BFV.

Para el lado izquierdo de la barra BFV, se tiene que para el arranque del motor M2 se cierra el interruptor S16 y se procede a aumentar su frecuencia hasta su punto máximo en 60 Hz. Al tener el motor M2 trabajando a 60 Hz, se procede a sincronizarlo con la frecuencia de la barra BFF cerrando el interruptor S9 y abriendo al mismo tiempo el S16, quedando entonces el motor trabajando directamente conectado a la barra BFF. De manera similar se procede a arrancar el motor M1, cerrando el interruptor S15, con la diferencia de que dicho motor se quedará trabajando directamente conectado a la barra BFV sin necesidad de sincronizarlo a la barra BFF. Ya que en el proceso de molienda de caña, el molino N0. 1 es el que principalmente necesita de variación de velocidad frecuentemente para uniformizar la molida por hora, así como la extracción del jugo primario.

Para el lado derecho de la barra BFV se tiene el mismo procedimiento. Para el motor M3 se cierra el interruptor S18 y cuando el motor está a 60 Hz, se sincroniza con la barra BFF por medio del interruptor S17. luego para el motor M4 se repite la operación, arrancándolo cerrando el interruptor S19 y luego sincronizarlo con el interruptor S12. En el motor M5 la situación es idéntica a la del motor M1, el cual, trabajará a velocidad variable, ya que en este último molino se controla la humedad del bagazo que va hacia las calderas por medio

de la velocidad del molino. Mientras más lento gire, mayor humedad se le podrá extraer.

Como una contingencia para cuando exista alguna situación que no permita operar a los variadores VFD 1 y 2, se tienen los interruptores S8 y S12 para poder arrancar los motores M1 y M5 directamente de la barra BFF.

El interruptor S7 servirá como enlace para la barra partida, en caso de que el VFD 1 falle. Al cerrar dicho interruptor, se podrá operar el motor M1 con el VFD 2 mientras se habilita el VFD 1. El motor M5 trabajará en ese tiempo alimentado de la barra BFF.

2.3 Cálculos para la selección de motor de inducción

De acuerdo a las necesidades anteriores, la potencia necesaria para mover el molino es la misma que la de la turbina (900 HP). Es necesario conocer el torque que el motor debe de entregar al reductor de alta para darle movimiento. Calculando el torque en la salida del reductor de alta, tenemos:

$$T_{RA} = \frac{5250 \times HP}{rpm}$$

$$T_{RA} = \frac{5250 \times 900}{400}$$

$$T_{RA} = 11,812.5 \text{ lb-pie}$$

En donde:

T_{RA} = Torque en el eje de salida del reductor de alta

HP = Potencia que recibe el reductor

Rpm = Velocidad del eje de salida del reductor.

Para sustituir la turbina de vapor, se calcula el torque para las distintas velocidades de motores que existen en el mercado:

Para obtener el torque que entregará el motor se utiliza la siguiente relación:

$$\frac{T_{R1}}{T_M} = \frac{\omega_m}{\omega_R}$$

De la cual se obtiene:

$$T_M = \frac{T_{R1} \omega_{R1}}{\omega_M}$$

De donde:

T_M = Torque del motor

T_{R1} = Torque en la salida del reductor

ω_{R1} = Velocidad angular de la salida del reductor

ω_M = Velocidad angular del motor

De la relación anterior, para un motor de 3,600 rpm se tiene:

$$T_M = \frac{11,812.5 \times 400}{3,600}$$

$$\mathbf{T_M = 1,312.5 \text{ lb-pie}}$$

De la misma forma se obtiene para un motor de 1,800 rpm:

$$T_M = \frac{11,812.5 \times 400}{1,800}$$

$$\mathbf{T_M = 2,625 \text{ lb-pie}}$$

Para un motor de 1,200 rpm se tiene:

$$T_M = \frac{11,812.5 \times 400}{1,200}$$

$$T_M = 3,937.5 \text{ lb-pie}$$

Para un motor de 900 rpm se tiene:

$$T_M = \frac{11,812.5 \times 400}{900}$$

$$T_M = 5,250 \text{ lb-pie}$$

Agrupando los datos en la siguiente tabla se obtiene la gráfica del Par-velocidad para los reductores.

Torque (lb-pie)	Velocidad (rpm)
5,250	900
3,937.5	1200
2,625	1800
1,312.5	3600

Tabla 2.01 Torque velocidad para reductores

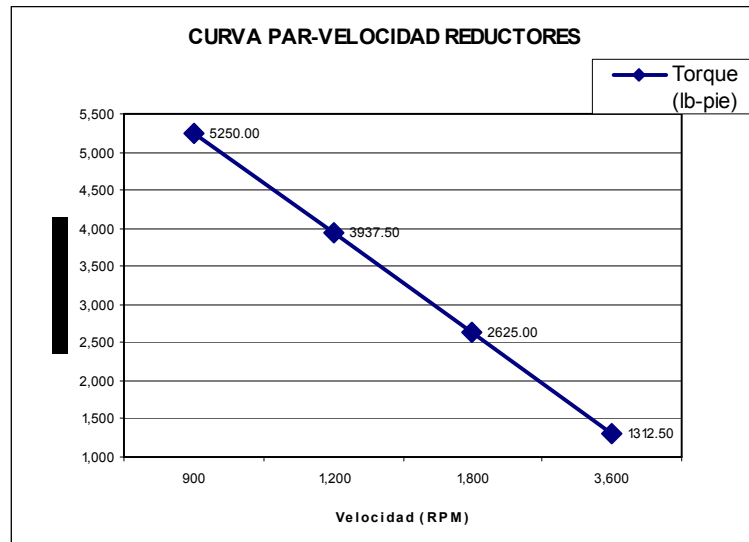


Figura 2.7 Curva Par-Velocidad reductor

Se puede observar en la figura 2.7 que el torque de un reductor es inversamente proporcional a su velocidad de entrada, por lo tanto, mientras mayor sea la velocidad del motor de entrada, mayor será su torque en la salida.

2.3.1 Potencia requerida

Actualmente, en el área de molinos la potencia mecánica es suministrada a partir de turbinas de vapor de 900 HP

2.3.2 Velocidad de operación

De acuerdo a los cálculos de torque necesario para vencer la carga del reductor, la velocidad requerida es de 3,200 rpm en el primero y quinto molino.

Según datos proporcionados por el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH), para la época de zafra (noviembre a marzo), la temperatura del ambiente oscila entre 19 y 39°C y la humedad relativa entre el 21 y 99%, como lo muestra la tabla 2.2 con datos proporcionados por el INSIVUMEH tomados de su estación Santa Ana.

ESTACION SANTA ANA

HUMEDAD RELATIVA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1998 MA	92.00	92.00	93.00	92.00	95.00	94.00	93.00	95.00	94.00	95.00	95.00	95.00
1998 MI	24.00	21.00	22.00	28.00	17.00	47.00	44.00	48.00	47.00	30.00	31.50	33.00
1999 MA	92.00	92.00	93.00	92.00	93.00	92.00	93.00	93.00	92.00	92.00	90.00	90.00
1999 MI	28.00	26.00	21.00	23.00	40.00	45.00	42.00	46.00	44.00	33.00	26.00	23.00
2000 MA	90.00	91.00	90.00	90.00	91.00	93.00	94.00	92.00	92.00	92.00	85.00	92.00
2000 MI	17.00	17.00	19.00	15.00	32.00	36.00	33.00	53.00	83.00	45.00	38.00	32.00
2001 MA	72.00	71.00	69.00	96.00	95.00	96.00	96.00	98.00	59.00	79.00	68.00	94.00
2001 MI	17.50	26.00	30.00	38.00	63.00	42.00	41.00	36.00	40.00	40.00	38.00	7.00
2002 MA	93.00	53.00	59.00	71.00	80.00	79.00	60.00	61.00	63.00	93.00	96.00	93.00
2002 MI	28.00	22.00	19.00	20.00	23.00	27.00	34.00	28.00	35.00	27.00	29.00	41.00
2003 MA	94.00	97.00	99.00	99.00	99.00	99.00	99.00	98.00	97.00	99.00	91.00	90.00
2003 MI	35.00	42.00	35.00	35.00	65.00	73.00	47.00	50.00	45.00	41.00	36.00	21.00

TEMPERATURA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1998 MA	36.50	39.50	38.50	39.00	40.50	39.50	38.50	35.00	35.00	35.00	34.50	35.50
1998 MI	17.50	16.00	20.50	22.00	21.00	21.00	20.00	20.00	20.00	20.00	19.00	18.00
1999 MA	35.50	37.50	38.50	38.50	37.00	35.50	36.00	35.50	35.00	34.00	35.50	34.50
1999 MI	17.00	15.50	17.00	17.50	19.50	19.50	19.00	19.00	19.00	17.50	17.00	18.50
2000 MA	36.00	34.50	34.50	34.50	35.50	35.50	36.00	34.50	35.00	37.00	37.00	37.50
2000 MI	17.00	18.00	18.50	18.50	20.50	19.50	19.50	20.00	19.00	18.00	17.50	16.50
2001 MA	43.00	39.50	38.50	39.50	37.50	48.00	36.50	37.50	36.00	36.50	36.50	36.50
2001 MI	16.50	16.50	16.50	18.50	20.00	18.20	17.50	20.50	18.00	19.50	18.50	18.50
2002 MA	37.50	39.00	40.00	38.00	37.50	35.50	35.50	35.00	34.50	35.00	35.50	35.50
2002 MI	17.50	18.00	19.00	18.00	21.00	20.50	20.50	20.50	21.00	20.50	20.00	19.50
2003 MA	37.50	37.50	37.50	39.00	36.50	35.00	35.50	35.00	35.00	35.00	34.50	35.50
2003 MI	19.00	20.00	19.00	20.00	21.50	21.00	21.00	21.00	20.50	20.80	20.50	19.00

Tabla 2.2 Temperatura y humedad relativa mínima y máxima desde 1998 a 2003.

Fuente: INSIVUMEH, Estación Santa Ana.

Debido a lo anterior, el diseño y tipo de enfriamiento del motor debe ser cualquiera de los siguientes:

TEFC (Totally Enclosed Fan Cooled)

TEAAC (Totally Enclosed Air to Air Cooled)

Si se toma la temperatura máxima del ambiente como 39°C, el tipo de aislamiento del motor será clase F, que soporta 155°C. Ya que el motor será accionado mediante un variador de frecuencia, será de tipo Inverter Duty².

2.3.5 Características de alimentación eléctricas

El ingenio Santa Ana opera con los siguientes niveles de voltaje:

13.8 KV

2.4 KV

0.48 KV

Todos en 60 Hz, debido a que esa es la frecuencia del sistema nacional interconectado y por supuesto de América.

Debido a la disponibilidad de ampliación de la carga en 2.4 KV y a que en el circuito de 13.8 KV no existe equipo disponible para agregar más cargas, El voltaje de operación del motor será 2.4 KV.

² La definición del motor tipo Inverter Duty es ampliada en el apéndice B

2.4 Cálculos para la selección de un variador de frecuencia

2.4.1 Situación de instalación y ambiente operacional

En este caso, la temperatura ambiente es de 35 C promedio y la humedad relativa es 90% promedio. El ambiente es húmedo y polvoriento, por lo que el variador tiene que ser instalado dentro de un ambiente seco, limpio y climatizado. En otras palabras, se debe de instalar dentro de un cuarto de control completamente cerrado, que contenga aire acondicionado.

2.4.2 Características eléctricas de alimentación

Al igual que en la sección 2.3.5, el voltaje para la alimentación del variador será de 2,400 VAC, 60 Hz.

2.4.3 Potencia del motor

La potencia del motor para este caso es de 900 HP

2.4.4 Corriente del motor

Tomando en cuenta el motor de 900 HP tenemos:

$$I = \frac{0.746 \times HP}{\sqrt{3} \times V \times \cos \phi}$$
$$I = \frac{0.746 \times 900}{\sqrt{3} \times 2,400 \times 0.85}$$

$$I = 198 \text{ A}$$

2.4.5 Tipo de variador

Las armónicas son las componentes no fundamentales de la frecuencia de una onda de energía eléctrica deformada de 60 Hz. Estas tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de 60 Hz. En general, las armónicas son producidas por equipo electrónico que, al estar presentes en la red eléctrica, producen falsos disparos, calentamiento de conductores y bajo factor de potencia. Debido a que los variadores con mayor número de armónicas son los de 6 pulsos, se elegirá uno de 12 pulsos, fuente de voltaje, con las secciones de convertidor e inversor compuestas por IGBT, los cuales tienen una respuesta más precisa en la etapa de switcheo y generan menos armónicas

2.5 Cálculos para seleccionar barras de alimentación de sistema

2.5.1 Carga instalada

La barra de alimentación del sistema se calculará para 5 motores de 900 HP con un factor de potencia de 0.85 y un transformador de 75 kVA para iluminación, calefacción y equipo auxiliar en bajo voltaje, de acuerdo a la figura 2.9.

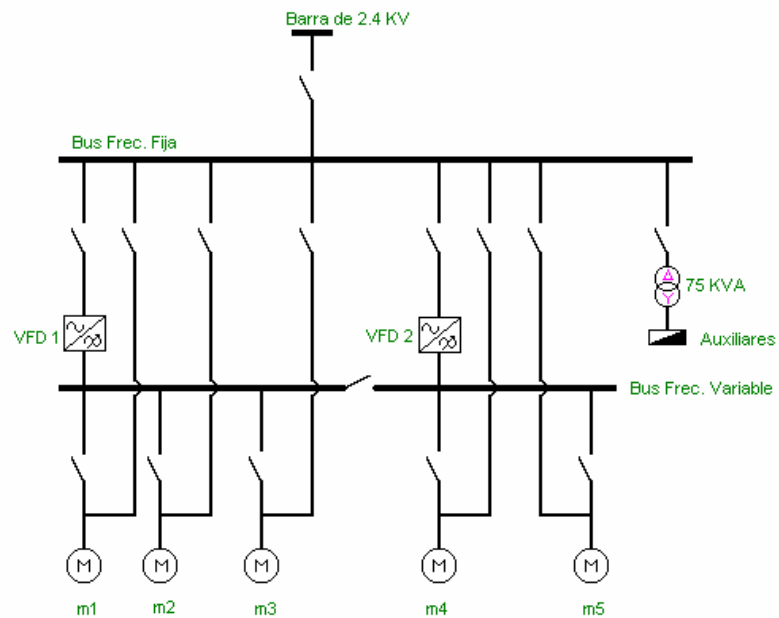


Figura 2.9 Diagrama unifilar del proyecto

Entonces se tiene:

5 motores 900 HP c/u = 4500 HP = 3,357 Kw.

1 Transformador 75 kVA = 64 Kw.

Total = 3,421 Kw.

Calculando la corriente nominal para la carga total, tenemos:

$$I_{\text{nom}} = \frac{P_{\text{total}}}{\sqrt{3}V \cos \phi}$$

$$I_{\text{nom}} = \frac{3421 \times 1000}{\sqrt{3} \times 2400 \times 0.85}$$

I_{nom} = 968.2 Amps

Tomando un 25% más por crecimiento y un 25% por temperatura tenemos:

$$I = 968.2 \times 1.25 \times 1.25$$

$$I = 1,512.8 \text{ Amps}$$

Este valor no lo encontramos en el mercado exactamente, por lo que tomaremos el valor inmediato superior que se fabrica, en este caso las barras deben tener capacidad para soportar 1,600 Amp.

2.6 Dimensionamiento de protecciones para sistema barra, motor y variador de frecuencia

2.6.1 Cálculo de corriente de cortocircuito

En la figura 2.10 se muestra el diagrama unifilar del sistema propuesto para calcular la corriente de cortocircuito.

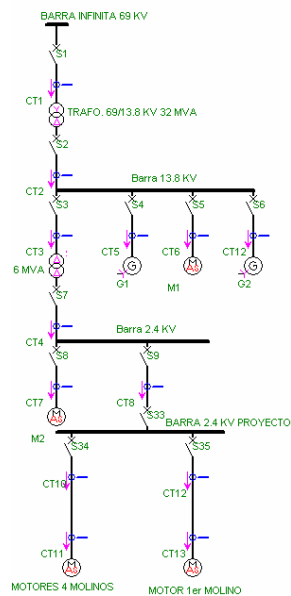


Figura 2.10 Diagrama unifilar del sistema

De acuerdo con el diagrama, se toman los siguientes datos técnicos de cada dispositivo:

BARRA INFINITA

	VALOR
V	69 KV
X	0
R	0

Tabla 2.3 Datos técnicos barra infinita

TRANSFORMADORES

	TRAFO 1	TRAFO 2
V1	69 KV	13.8 KV
V2	13.8 KV	2.4 KV
X	22.91	0.868
R	0	0

Tabla 2.4 Datos técnicos para transformadores

GENERADORES

	GEN 1	GEN 2
Vn	13.8 KV	13.8 KV
Rs	0.025	0.02
X	19.34	4.06
X'	2.84	5.68
X''	2.22	4.469
T'	0.3544	0.3
T''	0.0442	0.044
Xo	0.7414	14.829
Xq'	19.15	38.31
Xq''	3.28	6.56
Tq'	2.413	2.413
Tq''	0.0567	0.0567
P	15 MW	7.5 MW

Tabla 2.5 Datos técnicos para generadores

MOTORES

	M1	M2	MOT. 4 MOLINOS	M 1er MOLINO
Vn	13.8 KV	2.4 KV	2.4 KV	2.4 KV
Pn	7.65 MW	4.25 MW	2.686 MW	641 KW
Sn	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
PF	0.85	0.85	0.85	0.85
EF	0.9	0.9	0.9	0.9
Islin	3.5 KVA/HP	3.5 KVA/HP	3.5 KVA/HP	3.5 KVA/HP
P	7.65 MW	4.25 MW	2.686 MW	641 KW

Tabla 2.6 Datos técnicos para los motores

Utilizando el programa ELPLEK ¹, versión 0.8, el diagrama unifilar se muestra en la figura 2.11

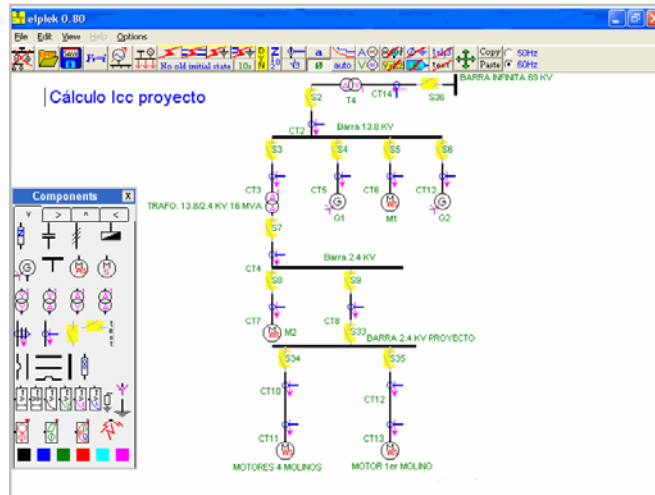


Figura 2.11 Representación del diagrama unifilar en el programa ELPLEK 0.8

Luego, antes de efectuar la corrida del programa, se localiza la falla (en este caso un cortocircuito trifásico en las terminales del motor del molino 1) en el lugar indicado para calcular la corriente de cortocircuito. En la figura 2.12 se muestra el lugar de la falla

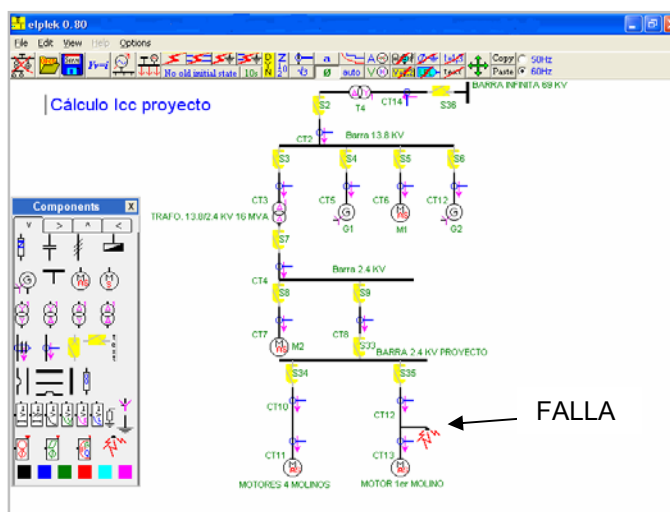


Figura 2.12 Localización de la falla trifásica

Se cierran todos los interruptores y corriendo el programa, se tiene:

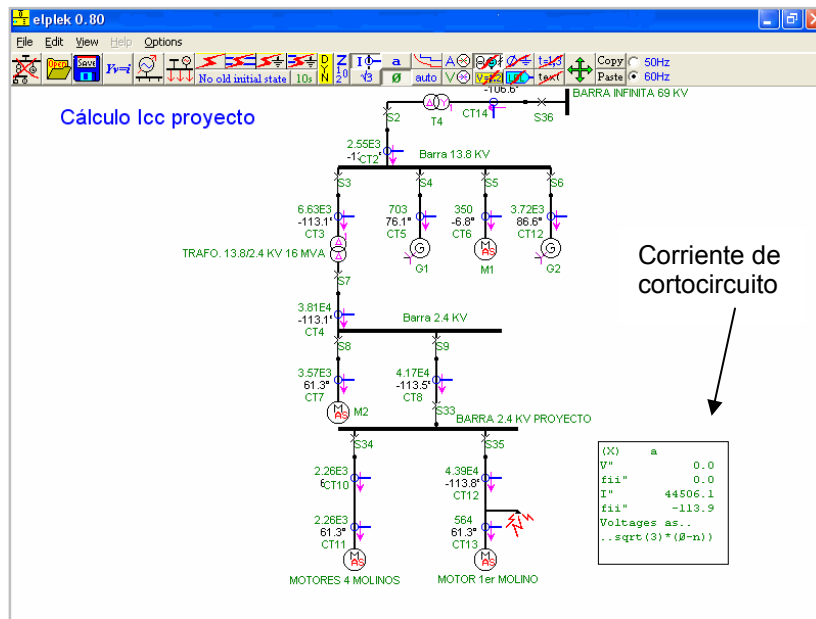


Figura 2.13 Corrida de programa para cálculo de corriente de cortocircuito

¹ El programa ELPLEK 0.8 fue elaborado con fines didácticos y puesto a disposición de todas las personas en la página Web: <http://pp.kpnet.fi/ij/>, cuyo autor es Ilkka Leikonen

Al visualizar el reporte que genera el programa, se obtienen las corrientes en todos los CT's del circuito.

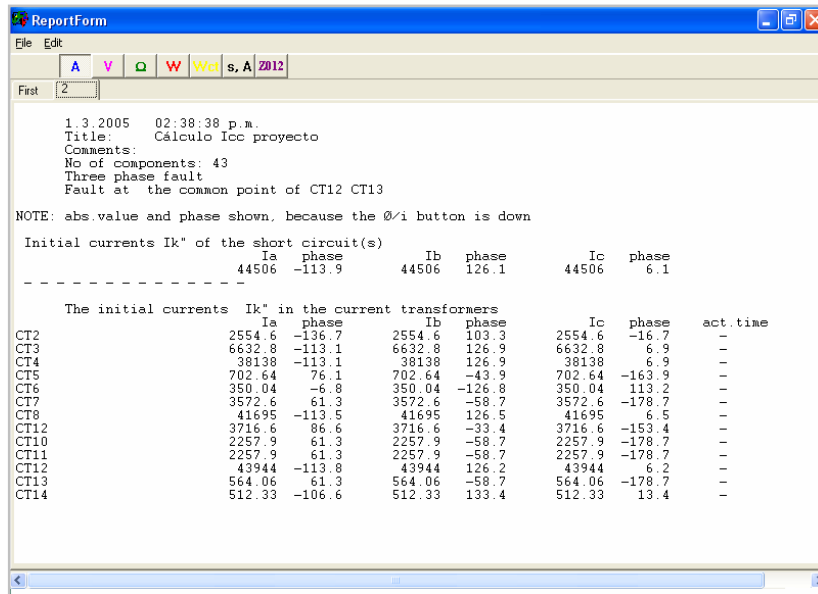


Figura 2.14 Reporte de corrientes del diagrama unifilar

Tomando en cuenta que la corriente de cortocircuito en el punto de la falla es:

$$I_{cc} = 44,506.1 \text{ Amp}$$

Y que la corriente en el CT No. 12 cuando ocurre la falla es de

$$I_{CT12} = 43,944 \text{ Amp}$$

Se necesita un circuit breaker o contactor con capacidad interruptiva de 63 KA para cada motor.

De la misma manera, como la corriente en el CT No. 8 es de 41,695 A, para el circuit breaker principal del CCM se necesita una capacidad interruptiva de 42 KA.

2.6.2 Cálculo de CT's para motor y barra

Se tiene para el motor:

$$I_{nom} = 198 \text{ Amp}$$

$$I_{falla} = 44 \text{ KA}$$

En este caso, se utilizarán CT's para la protección del motor. De acuerdo con la norma ANSI C57.13, para seleccionar un transformador de corriente, se debe definir las condiciones que un transformador de corriente debe cumplir cuando funciona conectado a relevadores de corriente, a fin de que desempeñe con seguridad sus funciones de protección. La clase de protección se asocia a una carga de norma y se define como la tensión en voltios que aparece en las terminales del secundario cuando circula por la carga una corriente igual a 20 veces la corriente nominal sin introducir un error mayor del 10%. Para transformadores con una corriente nominal de 5 amperios, la clase de protección se define para una corriente secundaria de 100 amperios.

Corriente secundaria a 100 amperios, 60 Clase de Precisión para Protección Norma ANSI C57.13.			
<i>Clase de Protección</i>	<i>Carga</i>	<i>Impedancia</i>	<i>Tensión Vs</i>
C-10	B0.1	0.1 ohmios	10 voltios
C-20	B0.2	0.2 ohmios	20 voltios
C-50	B0.5	0.5 ohmios	50 voltios
C-100	B1.0	1.0 ohmios	100 voltios
C-200	B2.0	2.0 ohmios	200 voltios
C-400	B4.0	4.0 ohmios	400 voltios
C-800	B8.0	8.0 ohmios	800 voltios

Tabla 2.7 Clases de transformador de corriente

De acuerdo con la tabla 2.7 se elige la clase C-10, el cual posee una impedancia de 0.1 Ohm y soporta una tensión de 10 volts. Debido a que en los relees multifunción el burden está alrededor de los 0.05 Ohms.

Encontrando la relación de transformación (RCT) para los CT's del motor se tiene que:

I_{falla} del motor = 44,000 Amp y debido a que en el secundario del CT debe circular una corriente no mayor a 100 Amp. Se tiene que:

$$I_{falla} \leq 20 \times 5 \times RCT$$

$$44,000 \leq 100RCT$$

$$440 \leq RCT$$

Debido a lo anterior, la relación de los CT's debería de ser entonces:

$$440 \times 5 = 2200$$

Tomando esta relación en la tabla 2.8, se toma el valor inmediato superior que es 2400:5

<i>Relaciones de Transformadores de Corriente, de norma y usuales simples en Amperios</i>		
5:5	150:5	1500:5
10:5	200:5	1600:5
15:5	250:5	2000:5
20:5	300:5	2400:5
25:5	400:5	2500:5
30:5	500:5	3000:5
40:5	600:5	3200:5
50:5	800:5	3500:5
75:5	1000:5	4000:5
100:5	1200:5	5000:5

Tabla 2.8 Relaciones de transformación de CT's

De la misma forma, para calcular el CT de protección para la alimentación principal de la barra se tiene que:

$$I_{falla} = 42 \text{ KA}$$

De acuerdo con la tabla 2.7 se elige la clase C-10, el cual posee una impedancia de 0.1 Ohm y soporta una tensión de 10 volts.

Encontrando la relación de transformación (RCT) para los CT's de la barra se tiene que:

$I_{falla \text{ barra}} = 42,000 \text{ Amp}$ y debido a que en el secundario del CT debe circular una corriente no mayor a 100 Amp. Se tiene que:

$$I_{falla} \leq 20 \times 5 \times RCT$$

$$42,000 \leq 100RCT$$

$$420 \leq RCT$$

Debido a lo anterior, la relación de los CT's debería de ser entonces:

$$420 \times 5 = 2100$$

Tomando esta relación en la tabla 2.8, se toma el valor inmediato superior que es 2400:5

2.6.3 Cálculos para escoger las curvas de disparo de los relés del motor y de barra

Para el motor se tiene un relé multifunción con las siguientes protecciones:

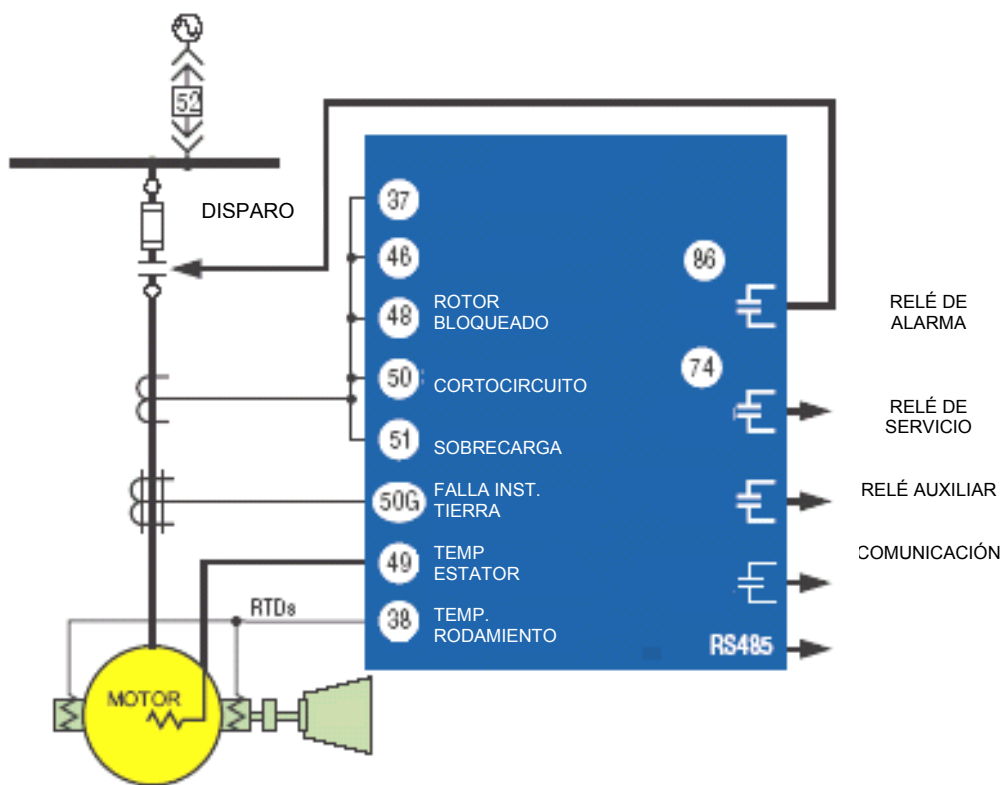


Figura 2.15 Relé multifunción para protección de motor

Este relé tiene sus curvas de disparo como las mostradas en la figura 2.16

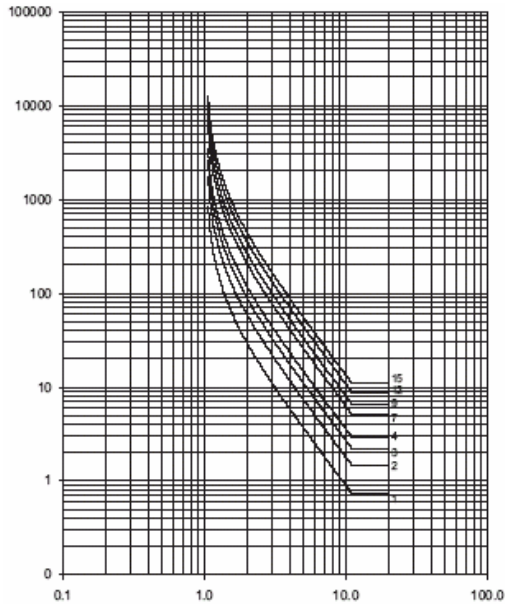


Figura 2.16 Curvas de disparo de relé multifunción para el motor

De acuerdo con la programación del relé multifunción, es necesario programar varias funciones del relé con las especificaciones técnicas del fabricante para el motor.

2.6.3.1 Corriente a plena carga

La corriente a plena carga del motor para este caso se tomará de los datos de placa de un motor utilizado para las mismas especificaciones. Según la tabla 2.9, para un motor de 900 HP se tiene una corriente a plena carga de **207 Amp**. Este es el máximo valor de corriente al cual el motor puede operar sin sobrecalentarse. Este dato es el valor de $1.0 \times I_{pick\ up}$ que se tomará de las curvas de protección por sobrecorriente de la figura 2.16. Cuando la corriente excede este valor, el tiempo por sobrecorriente empieza a contar,

eventualmente el relé mandará a disparar. Este tiempo no será activo cuando el motor arranque.

THREE-PHASE INDUCTION MOTORS
HGF LINE - 2300V - 60Hz - TEFC (IP55)
INSULATION CLASS F - SERVICE FACTOR 1.15
TEMPERATURE RISE 80°C AT SERVICE FACTOR 1.0



Power		Frame IEC	RPM	FULL LOAD AMPS	I1/In	T1/Tn	Tb/Tn	% OF FULL LOAD						Inertig (kgm ²)	LRT (sec.)	Weight (kg)
KW	HP							Efficiency			Power Factor					
								50	75	100	50	75	100			
2 POLE																
100	135	315L	3556	31.0	6.60	1.40	2.10	88.00	90.50	91.00	0.82	0.87	0.89	2.44	17.0	1200
112	150	315A	3556	34.6	6.60	1.40	2.10	88.50	90.60	91.20	0.82	0.87	0.89	2.50	17.0	1250
125	175	315A	3558	38.5	6.70	1.40	2.10	88.80	90.80	91.50	0.82	0.87	0.89	2.63	17.0	1300
140	200	315B	3558	43.1	6.70	1.40	2.10	89.00	90.80	91.80	0.82	0.87	0.89	2.78	18.0	1350
160	225	315B	3558	48.2	6.70	1.40	2.10	89.20	91.00	91.80	0.82	0.87	0.89	2.90	18.0	1400
180	250	315C	3560	55.2	6.70	1.40	2.10	89.20	91.00	92.00	0.82	0.87	0.89	3.38	18.0	1500
200	275	315C	3580	61.2	6.70	1.40	2.10	89.20	91.10	92.20	0.82	0.87	0.89	3.70	18.0	1650
225	300	315D	3582	67.9	6.80	1.40	2.10	89.40	91.20	92.40	0.83	0.88	0.90	4.03	18.0	1750
250	350	315D	3582	75.4	6.80	1.40	2.00	89.50	91.30	92.50	0.83	0.88	0.90	4.35	18.0	1850
280	370	315E	3585	84.2	6.80	1.40	2.00	89.80	91.40	92.80	0.83	0.88	0.90	4.54	19.0	1950
315	400	355B	3585	94.3	6.80	1.30	2.00	90.50	91.60	93.20	0.83	0.88	0.90	5.05	19.0	2200
355	450	355C	3585	105.9	6.80	1.30	2.00	91.00	92.00	93.50	0.84	0.89	0.90	5.53	20.0	2550
400	500	355C	3585	118.9	6.80	1.30	2.00	91.20	92.50	93.80	0.84	0.89	0.90	6.16	21.0	2850
450	600	355D	3588	133.5	6.80	1.30	2.00	91.80	92.80	94.00	0.84	0.89	0.90	6.70	21.0	2750
500	700	355E	3588	148.0	6.80	1.30	2.00	92.00	93.00	94.20	0.84	0.89	0.90	7.34	21.0	2850
560	750	400L	3588	163.5	6.90	1.10	2.00	92.20	93.50	94.50	0.84	0.90	0.91	11.00	20.0	3300
630	800	450L	3570	183.9	7.00	1.10	1.90	92.30	93.50	94.50	0.84	0.90	0.91	14.22	22.0	4500
710	900	450A	3570	206.6	7.00	1.10	1.90	92.50	93.70	94.80	0.84	0.90	0.91	15.13	22.0	4800
800	1000	450B	3570	232.3	7.00	1.10	1.90	92.60	93.90	95.00	0.84	0.90	0.91	16.48	22.0	5100
900	1250	450C	3570	280.8	7.00	1.10	1.90	92.80	94.00	95.20	0.85	0.90	0.91	17.39	22.0	5400
1000	1350	450D	3570	288.8	7.00	1.10	1.90	93.00	94.20	95.50	0.85	0.90	0.91	19.32	22.0	5700
1120	1500	450D	3570	322.5	7.00	1.10	1.80	93.20	94.50	95.80	0.85	0.90	0.91	22.52	22.0	5900
1250	1750	500L	3570	358.6	7.00	1.10	1.80	93.50	94.80	95.90	0.86	0.90	0.91	25.56	21.0	6400
1400	2000	500A	3570	402.3	7.00	1.00	1.80	93.80	95.00	96.00	0.86	0.90	0.91	29.75	21.0	7250
1500	2250	500B	3570	459.3	7.00	1.00	1.80	94.00	95.10	96.10	0.86	0.90	0.91	34.00	21.0	7800
1800	2500	580L	3570	511.1	7.00	1.00	1.80	94.00	95.20	96.10	0.87	0.91	0.92	38.36	21.0	8750
2000	2750	580A	3570	587.3	7.00	1.00	1.80	94.10	95.20	96.20	0.87	0.91	0.92	40.40	21.0	8900

Tabla 2.9 Características generales de motores eléctricos para mediana tensión

Fuente: Weg Electric Motor

2.6.3.2 Protección por sobrecarga del motor (51)

El relé multifunción para protección de motores, tiene 15 diferentes curvas de sobrecorriente vrs. tiempo. Para seleccionar la curva de protección por sobrecorriente del motor debe de ser configurada en el relé la máxima característica térmica del motor.

Si no está disponible la curva I^2t de daño del motor, como para este caso, se puede configurar la protección de la siguiente manera:

De la tabla 2.05 se obtiene la constante LRT, que en este caso es 22 segundos. Para la corriente de arranque, debido a que no existe información exacta del motor, se tomará la corriente como $6 \times I_{nom}$. De lo anterior, se tiene que:

$$\begin{aligned} LRT &= 22 \\ LRC &= 6 \times 207 \\ LRC &= 1242 \text{ Amp} \end{aligned}$$

En la figura 2.16 se localiza el valor de la constante LRT en el eje vertical y la LRC en el horizontal. Con esto se toma la curva más cercana al punto localizado. Para este caso, se toma la curva No. 9. Ver en la figura 2.17 la localización del punto.

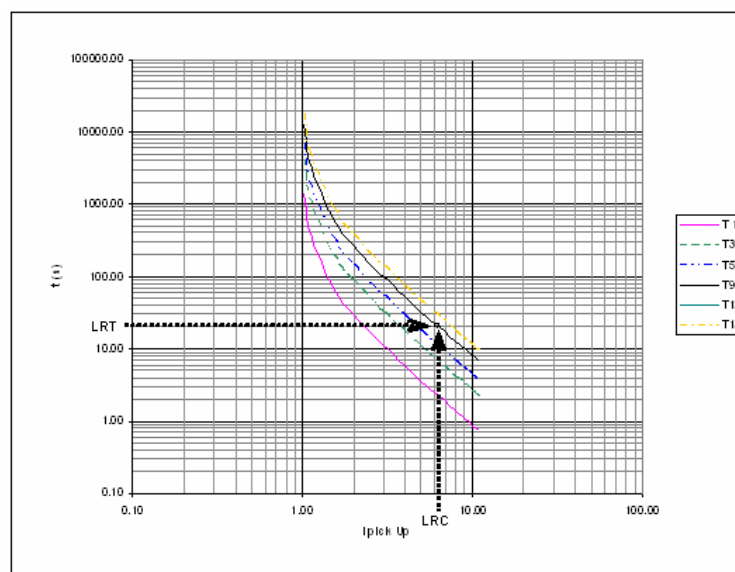


Figura 2.17 Localización de la curva de protección para el motor

Las curvas anteriores se obtienen de los datos de fábrica que están especificados en la tabla 2.06 sacada del manual del usuario del relé

multifuncional, en la cual se muestran los tiempos en segundos para las distintas curvas de protección por sobrecorriente para motores eléctricos.

2.6.3.3 Protección por sobrecarga inmediata

La configuración por sobrecarga inmediata es ajustable de 0.5 a 11 veces la corriente nominal del motor. La alarma del relé se activará cuando el promedio de las corrientes de las tres fases excede el valor de la corriente nominal del motor mientras este está en funcionamiento.

Para este caso, se configurará la protección por sobrecarga inmediata en:

$$8 \times \text{FLC} = 8 \times 207$$

$$= 1,656 \text{ A}$$

De donde:

FLC = Corriente nominal del motor.

De lo anterior, se obtiene la curva de protección del relé multifunción para un motor de 900 HP, en la figura 2.18.

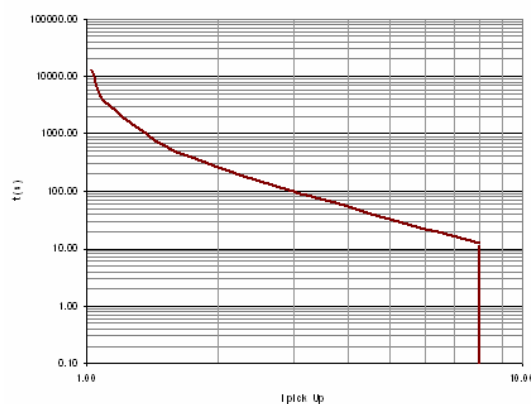


Figura 2.18 Curva de protección para motor de inducción de 900 HP

Esta protección es utilizada también cuando el rotor del motor se encuentra bloqueado **(48)** a la hora de un arranque. En este caso si estuviera bloqueado el rotor a la hora del arranque, de acuerdo a la curva de protección mostrada en la figura 2.18 la corriente de arranque para esta situación, no excedería 8 veces la corriente nominal y a la hora de que dicha corriente alcance ese valor, el relé mandará a disparar, protegiendo así al motor.

Taps	T 1	T2	T3	T4	T5	T7	T9	T10	T11	T13	T15
1.03	1437.00	2874.00	4311.00	5748.00	7184.00	10058.00	12932.00	14369.00	15806.00	18680.00	21553.00
1.05	854.00	1707.00	2561.00	3415.00	4269.00	5976.00	7683.00	8537.00	9391.00	11098.00	12806.00
1.10	416.70	833.40	1250.00	1666.70	2083.40	2916.80	3750.10	4166.80	4583.50	5416.90	6250.20
1.50	70.00	140.00	210.00	280.00	349.90	469.90	629.90	699.90	769.90	909.90	1049.80
2.00	29.20	58.30	87.50	116.60	145.80	204.10	262.40	291.60	320.70	379.10	437.40
2.50	16.70	33.30	50.00	66.60	83.30	116.60	149.90	166.60	183.30	216.60	249.90
3.00	10.90	21.90	32.80	43.70	54.70	76.50	98.40	109.30	120.30	142.10	164.00
4.00	5.80	11.70	17.50	23.30	29.10	40.80	52.50	58.30	64.10	75.80	87.40
5.00	3.64	7.29	10.93	14.57	18.22	25.50	32.79	36.43	40.08	47.36	54.65
6.00	2.50	5.00	7.49	9.99	12.49	17.49	22.48	24.98	27.48	32.48	37.47
8.00	1.39	2.78	4.16	5.55	6.94	9.71	12.49	13.88	15.27	18.04	20.82
10.00	0.88	1.77	2.65	3.53	4.42	6.18	7.95	8.83	9.71	11.48	13.25
11.00	0.73	1.46	2.19	2.91	3.64	5.10	6.56	7.29	8.01	9.47	10.93

Tabla 2.10 Tiempos en segundos para disparo por sobrecorriente de fase

2.6.3.4 Protección por baja corriente (37)

Los usos típicos de la protección por baja corriente incluyen para bombas cuando existe pérdida de succión, ventiladores cuando existe pérdida de flujo de aire o sistemas de transportadores para indicar la rotura de la cadena o faja con que se transmite la potencia. Para otras aplicaciones como en este caso, dicha protección se puede deshabilitar.

2.6.3.5 Protección por desbalance de fases (46)

El desbalance en las tres fases de la fuente de voltaje es la mayor causa de daño térmico en los motores de inducción. Puede ser causado por varios

factores y es común en el entorno industrial. Estas causas pueden incluir el incremento de la resistencia en una fase, conexiones flojas de un contactor o circuit breaker, o la posición desigual en los taps de un banco de transformadores de distribución. La causa más seria del desbalance de una fase en una fuente de alimentación es que puede ocasionar la fusión de un fusible de una fase y puede dañar seriamente un motor trifásico.

2.6.3.6 Configuración del *Pick Up* de disparo por desbalance

Los datos de los motores raramente proveen una medida directa de la temperatura del rotor, es entonces impráctico configurar un nivel de *pick up* de desbalance empírico. Para una situación de balance conocida, el nivel de *pick up* debe estar en 10% y el retardo del tiempo en 5 segundos como un punto inicial. El nivel de pick up puede disminuir hasta que se produzcan disparos por ruido. Para prevenir los disparos o alarmas por ruido en los motores cargados levemente, cuando más grande sea el nivel de desbalance, este no dañará el rotor, la detección de que una fase esté desbalanceada se hará cuando la corriente de la fase sea menor que el 30% del promedio de la corriente del motor a plena carga. El desbalance es calculado de la siguiente manera:

$$I_{av} \geq I_{FLC} : \frac{|I_m - I_{av}|}{I_{av}} \times 100\%$$

$$I_{av} < I_{FLC} : \frac{|I_m - I_{av}|}{I_{FLC}} \times 100\%$$

Donde:

I_{av} = Corriente promedio de fase

I_m = Corriente de fase con máxima desviación de I_{av}

I_{FLC} = Corriente del motor a plena carga

2.6.3.7 Protección por cortocircuito (50)

En algunas aplicaciones, la corriente de cortocircuito está por encima de la capacidad interruptiva del breaker o contactor. Esta corriente puede causar un daño en el breaker o que se queme un fusible. Para prevenir los daños a los contactores o breakers que no estén diseñados para estos niveles de interrupción, la protección por cortocircuito del relé multifunción se puede configurar para que dispare mucho antes del valor de esta corriente. Este nivel de protección se puede configurar desde 1 hasta 11 veces la corriente del primario del CT de una fase del motor. Cuando la corriente de una fase excede este valor de configuración durante el arranque o mientras el motor opera normalmente, la protección se activará instantáneamente o con un retardo programado.

Para este caso, se tomará la corriente de cortocircuito de una fase con el siguiente valor:

Según los cálculos anteriores, la corriente de cortocircuito en el motor es de 44 kA, por lo que se tiene:

$$44,000 / 2500 = 17.6 \text{ veces la corriente del primario del CT}$$

Para tener un valor seguro de protección, tanto del motor como del contactor o circuit breaker del motor, esta protección se configurará en:

$$3 \times 2500 = 7,500 \text{ A.}$$

2.6.3.8 Protección por falla instantánea a tierra (50G)

El envejecimiento y los ciclos térmicos eventualmente pueden causar una disminución en el aislamiento de los devanados del estator. Esto puede producir una baja impedancia desde la fuente de alimentación a tierra, resultando corrientes a tierra de grandes magnitudes, causando severas fallas tanto a la estructura del motor como a los equipos que operan junto con el. Para configurar el disparo por falla a tierra en el relé multifunción, primero hay que habilitarlo en el mismo. Luego, según la información del manual de operación del relé, esta corriente se debe setear generalmente en un valor no menor al 20% de la corriente del primario de los CT's de fase.

Para este caso se tomará como valor el 20%, por lo que se tiene:

$$20\% \times 2500 = 500 \text{ A}$$

Este será el valor de la corriente a la cual el relé va a disparar para proteger al motor.

2.6.3.9 Protección por temperatura del estator (49)

El aislamiento de los devanados del estator puede fallar a causa de un sobrecalentamiento. Para evitar este daño en los motores, sobre todo los grandes, se emplea un termistor en los devanados del estator y este a su vez se conecta al relé multifunción para que accione esa protección. En este caso y por lo general, los motores grandes traen incorporados sus propios termistores de fábrica, de acuerdo a la clase de aislamiento y al rango de temperatura de operación, por lo que únicamente se conectarán al relé multifuncional para habilitarle esa protección. La función del termistor es enviar una señal de

resistencia para una temperatura específica. Los termistores tipo PTC son los más utilizados. En la tabla 2.11 se muestran los diferentes valores de resistencia con su correspondiente valor de temperatura de los distintos tipos de termistores.

TEMPERATURE		100 Ω PLATINUM	100 Ω NICKEL	120 Ω NICKEL	10 Ω COPPER
°C	°F				
-40	-40	84.27 Ω	79.13 Ω	92.76 Ω	7.490 Ω
-30	-22	88.22 Ω	84.15 Ω	99.41 Ω	7.876 Ω
-20	-4	92.15 Ω	89.23 Ω	106.41 Ω	8.253 Ω
-10	14	96.09 Ω	94.58 Ω	113.0 Ω	8.649 Ω
0	32	100.0 Ω	100.0 Ω	120.0 Ω	9.035 Ω
10	50	103.9 Ω	105.6 Ω	127.2 Ω	9.421 Ω
20	68	107.8 Ω	111.2 Ω	134.5 Ω	9.807 Ω
30	86	111.7 Ω	117.1 Ω	142.1 Ω	10.19 Ω
40	104	115.5 Ω	123.0 Ω	149.8 Ω	10.58 Ω
50	122	119.4 Ω	129.1 Ω	157.7 Ω	10.97 Ω
60	140	123.2 Ω	135.3 Ω	165.9 Ω	11.35 Ω
70	158	127.1 Ω	141.7 Ω	174.3 Ω	11.74 Ω
80	176	130.9 Ω	148.3 Ω	182.8 Ω	12.12 Ω
90	194	134.7 Ω	154.9 Ω	191.5 Ω	12.51 Ω
100	212	138.5 Ω	161.8 Ω	200.6 Ω	12.90 Ω
110	230	142.3 Ω	168.8 Ω	209.9 Ω	13.28 Ω
120	248	146.1 Ω	176.0 Ω	219.3 Ω	13.67 Ω
130	266	149.8 Ω	183.3 Ω	228.9 Ω	14.06 Ω
140	284	153.6 Ω	190.9 Ω	238.8 Ω	14.44 Ω
150	302	157.3 Ω	198.7 Ω	249.0 Ω	14.83 Ω
160	320	161.0 Ω	206.6 Ω	259.3 Ω	15.22 Ω
170	338	164.8 Ω	214.8 Ω	269.9 Ω	15.61 Ω
180	356	168.5 Ω	223.2 Ω	280.8 Ω	16.00 Ω
190	374	172.2 Ω	231.6 Ω	291.9 Ω	16.38 Ω
200	392	175.8 Ω	240.0 Ω	303.5 Ω	16.78 Ω

Tabla 2.11 Resistencia vs. Temperatura de diferentes termocoplas

2.6.3.10 Protección por temperatura de rodamientos (38)

La protección por elevadas temperaturas en los rodamientos del motor debido a falta de lubricación o desgaste de los mismos, es indispensable en los motores eléctricos de gran tamaño. Para este tipo de protección, se utilizan termistores o termocoplas, con los valores mostrados en la tabla 2.11. Para este caso y generalmente, la protección por temperatura en los rodamientos del

motor será configurada como lo indica el manual del relé. Para una temperatura de 70° C, el relé activará una alarma y para 90° C, el relé mandará a disparar el motor, protegiéndolo así. Para este caso, se utilizarán termocoplas de platino de 100 Ohm. Teniendo así que para una temperatura de 70° C, la termocopla medirá 127.1 Ohms y para 90° C, la lectura será de 134.7 Ohms.

2.6.3.11 Protección de barra alimentadora o bus

Para la protección de la barra o bus, se tiene el diagrama del relé multifunción que se utilizará para dicho propósito.

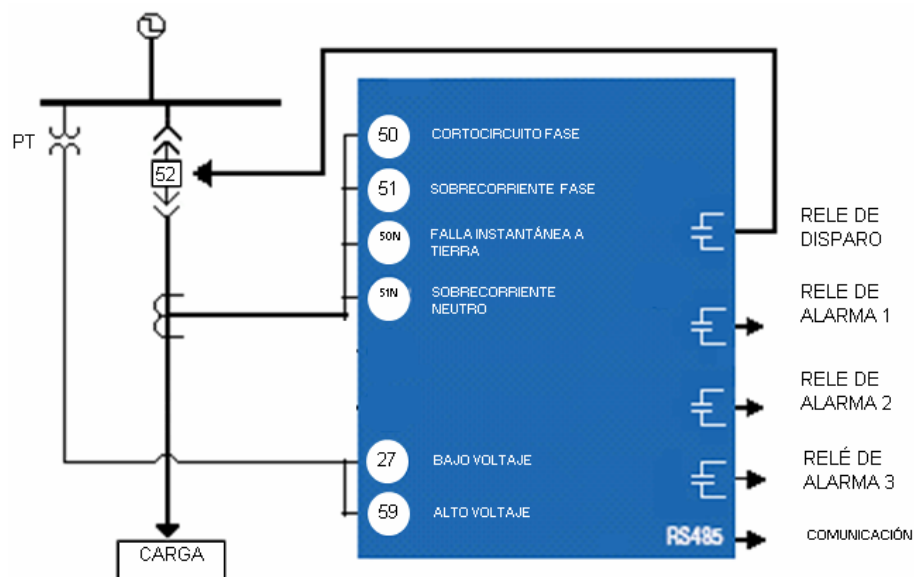


Figura 2.19 Diagrama esquemático del relé multifunción

2.6.3.12 Protección por sobrecarga (51)

La protección de sobrecarga, está definida por las distintas curvas de disparo del relé multifunción. Para este caso se trabajará con las curvas ANSI para sobrecorriente, conforme a los estándares de la norma ANSI C37.90. Para este caso, cada una de las curvas son derivadas de la siguiente ecuación:

$$T = M \times \left(A + \frac{B}{\frac{I}{I_{pu}} - C} + \frac{D}{\left(\frac{I}{I_{pu}} - C\right)^2} + \frac{E}{\left(\frac{I}{I_{pu}} - C\right)^3} \right)$$

De donde:

T = Tiempo de disparo (segundos)

M = Valor del multiplicador

I = Corriente de entrada

I_{pu} = Configuración de Corriente Pick Up

A, B, C, D, E = Constantes según la tabla 2.12

ANSI CURVE	A	B	C	D	E
E. Inverse	0.0399	0.2294	0.500	3.0094	0.7222
V. Inverse	0.0615	0.7989	0.340	-0.284	4.0505
N. Inverse	0.0274	2.2614	0.300	-4.1899	9.1272
M. Inverse	0.1735	0.6791	0.800	-0.08	0.1271

Tabla 2.12 Constantes de curvas ANSI

Para este caso se utilizarán las curvas ANSI. De acuerdo con la ecuación anterior, se obtienen los datos correspondientes para los distintos taps del relé multifunción en la siguiente tabla:

MULTIPLICADOR (TDM)	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ANSI EXTREMADAMENTE INVERSA										
0.5	2.000	0.872	0.330	0.184	0.124	0.093	0.075	0.063	0.055	0.049
1	4.001	1.744	0.659	0.368	0.247	0.185	0.149	0.126	0.110	0.098
2	8.002	3.489	1.319	0.736	0.495	0.371	0.298	0.251	0.219	0.196
4	16.004	6.977	2.638	1.472	0.990	0.742	0.596	0.503	0.439	0.393
6	24.005	10.466	3.956	2.208	1.484	1.113	0.894	0.754	0.658	0.589
8	32.007	13.955	5.275	2.944	1.979	1.483	1.192	1.006	0.878	0.786
10	40.009	17.443	6.594	3.680	2.474	1.854	1.491	1.257	1.097	0.982
ANSI MUY INVERSA										
0.5	1.567	0.663	0.268	0.171	0.130	0.108	0.094	0.085	0.078	0.073
1	3.134	1.325	0.537	0.341	0.260	0.216	0.189	0.170	0.156	0.146
2	6.268	2.650	1.074	0.682	0.520	0.432	0.378	0.340	0.312	0.291
4	12.537	5.301	2.148	1.365	1.040	0.864	0.755	0.680	0.625	0.583
6	18.805	7.951	3.221	2.047	1.559	1.297	1.133	1.020	0.937	0.874
8	25.073	10.602	4.295	2.730	2.079	1.729	1.510	1.360	1.250	1.165
10	31.341	13.252	5.369	3.412	2.599	2.161	1.888	1.700	1.562	1.457
ANSI NORMALMENTE INVERSA										
0.5	2.142	0.893	0.377	0.256	0.203	0.172	0.151	0.135	0.123	0.113
1	4.284	1.766	0.754	0.513	0.407	0.344	0.302	0.270	0.246	0.226
2	8.568	3.531	1.508	1.025	0.814	0.689	0.604	0.541	0.492	0.452
4	17.137	7.062	3.016	2.051	1.627	1.378	1.208	1.082	0.983	0.904
6	25.705	10.594	4.524	3.076	2.441	2.067	1.812	1.622	1.475	1.366
8	34.274	14.125	6.031	4.102	3.254	2.756	2.415	2.163	1.967	1.808
10	42.842	17.656	7.539	5.127	4.068	3.445	3.019	2.704	2.458	2.260
ANSI MODERADAMENTE INVERSA										
0.5	0.675	0.379	0.239	0.191	0.166	0.151	0.141	0.133	0.128	0.123
1	1.351	0.757	0.478	0.382	0.332	0.302	0.281	0.267	0.255	0.247
2	2.702	1.515	0.955	0.764	0.665	0.604	0.563	0.533	0.511	0.493
4	5.404	3.030	1.910	1.527	1.329	1.208	1.126	1.066	1.021	0.986
6	8.106	4.544	2.866	2.291	1.994	1.812	1.689	1.600	1.532	1.479
8	10.807	6.059	3.821	3.054	2.659	2.416	2.252	2.133	2.043	1.972
10	13.509	7.574	4.776	3.818	3.324	3.020	2.815	2.666	2.554	2.465

Tabla 2.13 Valores de tiempo para las diferentes curvas ANSI

De acuerdo a la tabla 2.13, se plotean los datos para obtener las curvas de disparo por sobrecorriente. Tomando en cuenta la corriente nominal de la barra cuando trabajan los cinco motores a la vez, se tiene:

$$I = 970 \text{ Amp}$$

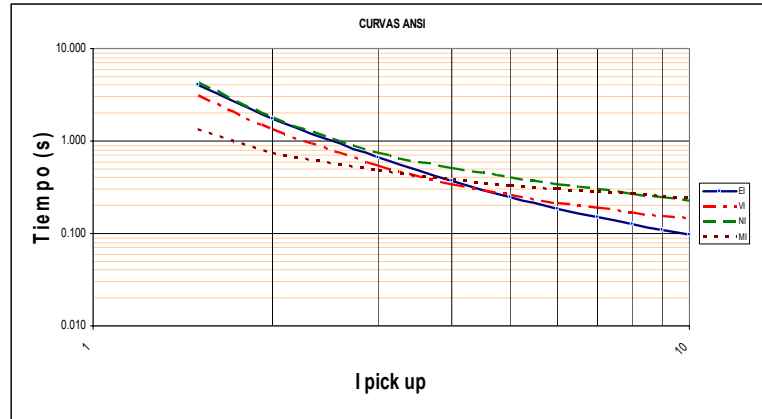


Figura 2.20 Curvas ANSI de acuerdo al tap No. 1 desde la E. Inversa hasta la M. inversa

Para la corriente nominal de 970 Amp, los valores de tiempos y corrientes tanto en el primario como en el secundario de los CT's se muestran a continuación:

I ct	I nom	I pu
1.94	970	1
2.91	1455	1.5
3.88	1940	2
5.82	2910	3
7.76	3880	4
9.7	4850	5
11.64	5820	6
13.58	6790	7
15.52	7760	8
17.46	8730	9
19.4	9700	10

Tabla 2.14 Valores de corriente por unidad para el bus de alimentación

2.6.3.13 Protección por bajo voltaje (27)

Para cargas sensibles al bajo voltaje de línea, como los motores de inducción, una caída en el voltaje resultará en un incremento de la corriente, la cual puede causar daños por sobrecalentamiento del motor. La protección por bajo voltaje en este caso, generará una alarma y luego de un tiempo, si continúa, el relé mandará a disparar al motor.

Para este caso, el relé será configurado de la siguiente manera:

$$0.9 \times VT$$

$$0.9 \times 2300 = 2070 \text{ Volts}$$

El tiempo desde que ocurre la alarma hasta el disparo, se dejará configurado para 2 seg. debido a que entre la configuración del relé, es necesario escoger este parámetro entre 3 valores, 1, 2 y 5 segundos.

2.6.3.14 Protección por alto voltaje (59)

Para proteger los equipos sensibles a un incremento de voltaje en la línea, el relé será configurado de manera similar a la protección por bajo voltaje. Valor máximo permitido:

$$SV = 1.25 \times VT$$

$$SV = 1.25 \times 2300$$

$$SV = 2875 \text{ Volts}$$

Donde SV = Sobre voltaje

De la misma manera, el tiempo de retardo se escoge entre tres valores, para este caso se tomará:

$$T = 5 \text{ seg.}$$

Debido a que el aislamiento del motor es para 5 kV y en este tiempo no tendría daños el motor por falla de aislamiento.

2.6.3.15 Protección por cortocircuito (50)

Al igual que el relé multifunción para el motor, para la protección de la barra, la corriente de cortocircuito a veces es demasiado alta que la capacidad interruptiva del circuit breaker. Esta corriente puede causar un daño en el circuit breaker o que se queme algún fusible. Para prevenir los daños a los contactores o circuit breakers que no estén diseñados para estos niveles de interrupción, la protección por cortocircuito del relé multifunción también se puede configurar para que dispare mucho antes del valor de esta corriente. Este nivel de protección se puede configurar desde 1 hasta 15 veces la corriente del primario del CT de una fase de la barra alimentadora. Cuando la corriente de una fase excede este valor de configuración durante una sobrecarga, la protección se activará instantáneamente o con un retardo programado.

Para este caso, se tomará la corriente de cortocircuito de una fase con el siguiente valor:

Según los cálculos anteriores, la corriente de cortocircuito en el bus es de 42 kA, por lo que se tiene:

$$42,000 / 2500 = 16.8 \text{ veces la corriente del primario del CT}$$

Para tener un valor seguro de protección, tanto de la barra como del contactor o circuit breaker principal, esta protección se configurará en:

$$10 \times 2500 = 25,000 \text{ A.}$$

2.6.4 Coordinación de protecciones

Para coordinar las protecciones, tanto del motor como las de la barra alimentadora, se plotean los datos de ambos en una misma gráfica. Dichas protecciones quedarán coordinadas si la curva de protección del motor queda debajo de la curva de la barra. Para este caso se tomará para la protección de la barra, la curva No. 8 Muy Inversa, que es la que más se acerca a la forma de la curva del motor y la que posee un tiempo razonable de separación. En la figura 2.21 se muestran las curvas finales de protección por sobrecorriente para cada motor y la barra.

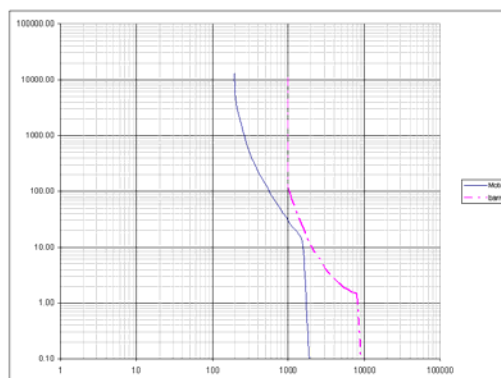


Figura 2.21 Curvas de sobrecorriente para motor y barra

2.7 Dimensionamiento de conductores para alimentación de sistema Barra, Motor y Variador de frecuencia

Para la alimentación del sistema barra, motor, Variador se utilizarán cables aislados, los cuales podrán ser de aislamiento seco termoplástico o termoestable adecuado para el nivel de voltaje utilizado, que cumplan con las normas técnicas aceptadas de acuerdo al NEC.

La instalación debe cumplir como mínimo las siguientes consideraciones:

- El aislamiento del cable tiene que ser para 5 kV
- El cable debe ser del tipo apantallado con aislamiento XLPE
- La longitud del cable entre el variador y el motor no debe ser mayor a 300 m

En la siguiente figura se puede observar el diagrama de la instalación del sistema.

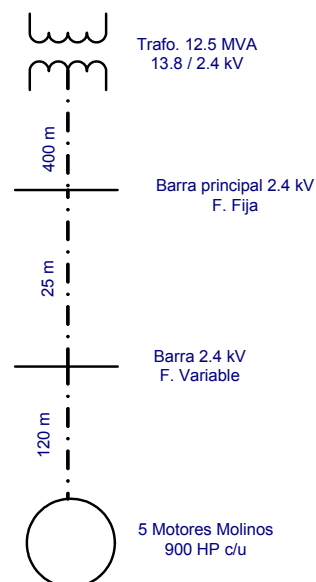


Figura 2.22 Alimentación eléctrica del sistema propuesto

Para la alimentación de la barra principal, tenemos una corriente nominal de 1,600 Amp. Una distancia de 400 m y un porcentaje de caída de tensión máximo de 3%.

Calculando en área de los conductores para una distancia de 400 m se tiene:

$$\text{Área} = \frac{\sqrt{3}LI \cos \phi}{57\Delta V}$$

$$\text{Área} = \frac{\sqrt{3} \times 400 \times 1600 \times 0.85}{57 \times 0.03 \times 2400}$$

$$\text{Área} = 229.6 \text{ mm}^2$$

Debido a que el área corresponde a un cable calibre 500 MCM MV-90 y según la tabla 2.11 soporta 470 amperios, se calculará el calibre del conductor por medio de la siguiente operación:

$$1600 / 470 = 3.4$$

Entonces se eligen 4 conductores calibre 500 MCM por fase para alimentar la barra, lo que da una disponibilidad de 1,880 amperios.

Para la alimentación de la barra variable tenemos que existe una distancia de 25 metros, pero por en valor de voltaje que se manejará y debido a que dicha barra es partida y solo alimentará un motor a la vez, la caída de voltaje es despreciable.

Entonces, ya que la corriente de un solo motor es

$$I_{\text{mot}} = 190 \text{ Amps}$$

En la tabla 2.15, el cable adecuado para dicha corriente es 4/0, que soporta 290 Amp.

Calibre de Conductor (AWG ó kcmil)	2001 - 5000 Volts		5001 - 35,000 Volts	
	Ampacidad		Ampacidad	
	90°C (194°F)	105°C (221°F)	90°C (194°F)	105°C (221°F)
	Tipo MV-90	Tipo MV-105	Tipo MV-90	Tipo MV-105
8	64	69	-	-
6	85	92	90	97
4	110	120	115	125
2	145	155	155	165
1	170	180	175	185
1/0	195	210	200	215
2/0	220	235	230	245
3/0	250	270	260	275
4/0	290	310	295	315
250	320	345	325	345
350	385	415	390	415
500	470	505	465	500
750	585	630	565	610
1000	670	720	640	690

Tabla 2.15 Capacidades de cables eléctricos. Fuente: NEC 1999

Para alimentar los motores desde la barra variable, la caída de voltaje es despreciable, ya que el cálculo para una distancia mayor (400 m) el porcentaje de caída es menos del 1%. En conclusión, el calibre del cable de alimentación para cada motor es 4/0 AWG por fase.

Polietileno reticulado (XLPE):

Es un material termoestable (una vez reticulado no se ablanda con el calor) presenta mejores características eléctricas y térmicas que el PVC por lo que se lo utiliza en la construcción de cables de baja, media y alta tensión.

Con el agregado de aditivos especiales se consigue una buena resistencia a la propagación del incendio. La ausencia de halógenos en su composición hace que los gases, producto de su eventual combustión no sean tóxicos o corrosivos.

Su termo estabilidad hace que puedan funcionar en forma permanente con temperaturas de 90° C en los conductores y 250° C durante 5 segundos en caso de cortocircuito.

Los cables aislados en XLPE responden a las normas IEC 502 para alta tensión.

Para este caso, el aislamiento de los conductores será el XLPE de 5 KV y que soporte una temperatura de 90° C.

2.8 Cálculos para la selección de un sincronoscopio

Los sincronoscopios están diseñados para circuitos de 120 volts y operan propiamente con voltajes que no difieran del 10 % de este valor. Para voltajes mayores a 130 volts es necesario el uso de transformadores de potencial.

Para los sincronoscopios análogos, las palabras FAST y SLOW en la escala, indican respectivamente que la frecuencia de entrada de la máquina es

más alta o más baja que la frecuencia del bus. La rotación del indicador en sentido horario, significa que la máquina está operando más rápido que el sistema. La rotación en sentido antihorario significa que la máquina opera más despacio que el sistema. El sincronismo de ambos es indicado cuando el indicador o apuntador del aparato se encuentra en la marca de la parte superior de la escala.

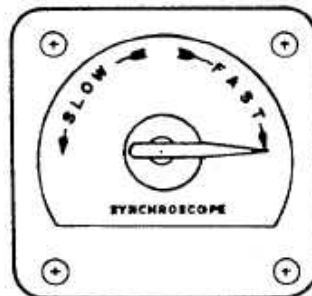


Figura 2.23 Escala de sincroscopecio

Para el caso de los sincroscopecios electrónicos, la operación es de manera similar. En las terminales de entrada del equipo se conectan las mediciones de voltaje tanto de la fuente principal como del equipo a sincronizar. Al estar presentes estas señales, el equipo se encarga de medir qué tan cerca se encuentran el voltaje y la frecuencia de las dos fuentes para proceder después, a enviar una señal de control para realizar la maniobra de sincronización automáticamente. De acuerdo a la programación inicial que se configure en el equipo, se puede realizar una maniobra más segura y precisa al tomar en cuenta los límites diferenciales máximos admisibles para los principales parámetros que se involucran como voltaje, frecuencia y tiempo de operación del circuit breaker.

Para la selección del sincronoscopio para el proyecto propuesto, se elegirá las siguientes características, tomando en cuenta que se designará con subíndice 1 a la fuente principal y con el 2 a la fuente a sincronizar.

2.8.1 Voltaje de alimentación del equipo

Para la mayoría de equipos de este tipo, el voltaje de alimentación se encuentra entre el rango de 100 a 240 VAC.

2.8.2 Voltaje de las señales de entrada

En este caso, como el voltaje de operación del proyecto es de 2,400 VAC, se calcularán las relaciones de transformación para los transformadores de potencial que se necesitarán, ya que el equipo puede trabajar con señales de 110 a 130 VAC.

$$RPT = \frac{2,400}{120}$$

$$RPT = 20$$

Debido a lo anterior, los PT's que se utilizarán serán con relación 20:1

2.8.3 Señales auxiliares de control de entrada

Entre las principales señales de control que necesita el equipo para su correcta operación están:

- Voltaje V_1
- Voltaje V_2
- Frecuencia F_1
- Frecuencia F_2
- Confirmación de abierto para circuit breaker CB_1 y CB_2
- Verificación de sincronía de las dos fuentes

Donde se necesitará que posea por lo menos 7 entradas.

2.8.4 Señales auxiliares de salida

Para las señales de salida se tienen:

- Ajuste de frecuencia F_2 para fuente a sincronizar
- Mando de cierre a circuit breaker CB_2
- Mando de apertura a circuit breaker CB_1

Debido a lo anterior, se necesitarán al menos 2 salidas de control. Tomando en cuenta los criterios anteriores, se deberá conectar el equipo de acuerdo al siguiente diagrama:

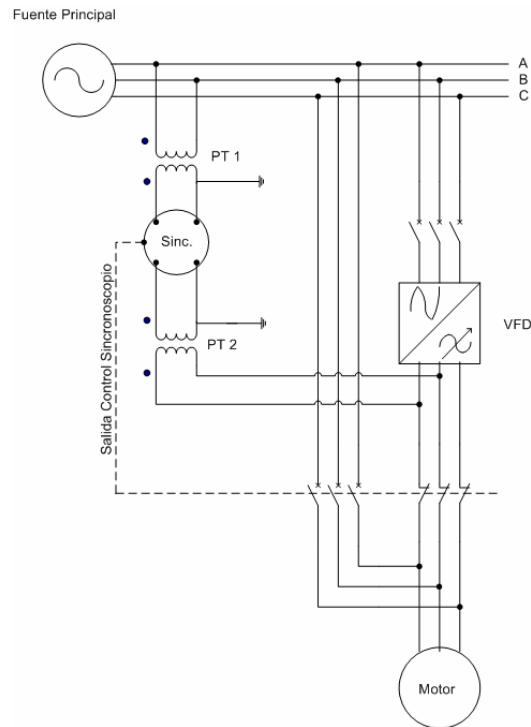


Figura 2.24 Diagrama de conexión de sincronoscopio electrónico

Luego de conectar el equipo como el diagrama de la figura 2.24 se procede a configurar los parámetros principales para la fuente principal y la que se va a sincronizar:

- Frecuencia
- Voltaje
- Relación de PT's
- Salida de control de frecuencia

Límites diferenciales de frecuencia

- Límites diferenciales máximos de ángulo para sincronización
- Tiempo de respuesta de circuit breaker CB1 y CB2

En la figura 2.25 se observa la conexión final de control para los sincronoscopios que se utilizarán para el proyecto.

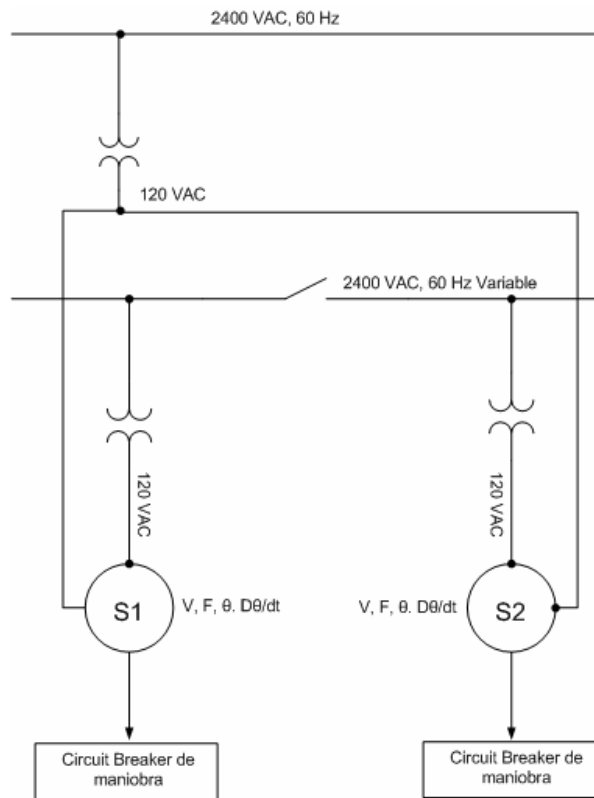


Figura 2.25 Conexión final de sincronoscopio

3. SIMULACION Y PRUEBAS

En el presente capítulo, se describe una simulación del sistema propuesto utilizando un modelo construido a escala. El modelo se construyó a partir de dispositivos eléctricos a una escala de 300:1. El tipo de conexión y la forma de trabajo del modelo son idénticos a los que se utilizarán realmente en el proyecto.

Con el funcionamiento de este modelo, se pretende, mediante algunas mediciones efectuadas, demostrar que un motor a 60 Hz conectado a un variador de frecuencia se puede sincronizar a una fuente de frecuencia fija, en este caso la misma fuente que alimenta el variador.

Dicho modelo a escala se construyó utilizando los siguientes dispositivos:

- 1 Variador de frecuencia de 3 HP, 460 VAC, PWM
- 1 Motor eléctrico de inducción de 3 HP, 460 VAC
- 2 contactores de 3 polos, 460 volts, 30 Amp.
- 2 estaciones de mando para el control de los contactores
- 2 transformadores de potencial de 100 VA, 480/120 VAC
- 1 Sincronoscopio análogo para la sincronización.
- Varios interruptores automáticos para protección.

Todos los dispositivos mencionados anteriormente se conectaron de la manera que se muestra en la figura 3.01.

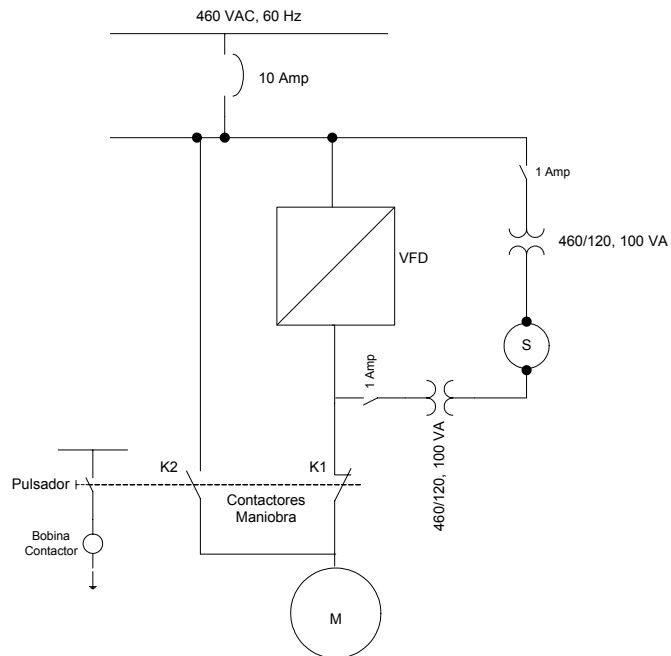


Figura 3.1 Diagrama de conexión modelo a escala

3.1 Diseño de un modelo electromecánico a escala

Para el motor, se tiene un motor eléctrico de inducción con los siguientes datos de placa:

3 HP

460 Volts

3 fases

1750 rpm

TEFC

4.0 Amp

Eficiencia 86.5%



Figura 3.2 Imagen del motor eléctrico utilizado

Para el Variador, se tiene un Variador de frecuencia con las siguientes características:

3 HP

460 Volts

5 Amp nominal

10 Amp pico

2.5 KHz PWM

Fuente de voltaje

Servicio continuo

Factor de servicio 1.0



Figura 3.3 Imagen de variador de frecuencia utilizado

Para el sincronoscopio, se tienen las siguientes especificaciones:

120 Volts AC entrada

Escala Show-Fast

Frecuencia 60 Hz



Figura 3.4 Imagen del sincronoscopio

Para los dos contactores de maniobra se tienen los siguientes datos:

120 Volts mando

600 VAC fuerza

3 polos

Corriente nominal: 27 Amp

Para los transformadores de mando se tienen los siguientes datos:

480 Volts primario

120 Volts secundario

100 VA capacidad

Para protección se tienen los siguientes dispositivos:

Circuit Breaker principal

600 VAC

3 polos

20 Amp

Circuit Breaker control

600 VAC

1 polo

1 Amp

Todos estos dispositivos se conectan como se muestra en la figura 3.5



Figura 3.5 Imagen de modelo a escala completo

3.2 Procedimiento de puesta en marcha del modelo a escala

Se procede a energizar el modelo mediante el circuit breaker principal desde una fuente trifásica de 460 Volts y 60 Hz. Al estar energizado el variador de frecuencia, se empieza a aumentar la frecuencia poco a poco hasta llegar a 60 Hz. En este momento se medirán las formas de onda de las señales de la salida del variador y la fuente de alimentación, con la ayuda de un osciloscopio de dos canales. El resultado se muestra en la figura 3.6

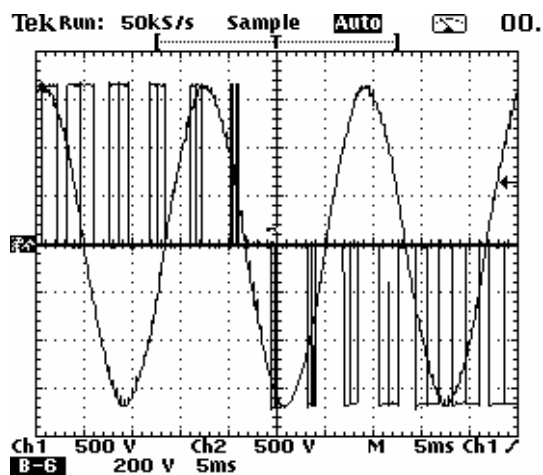


Figura 3.6 Formas de onda de las dos fuentes

En la figura anterior se puede observar la regulación de la tensión de la salida variando la anchura de los pulsos. Esto permite que el funcionamiento del motor se asemeje a uno alimentado por tensiones senoidales de la red.

Seguidamente, se energiza el sincronoscopio y observando el apuntador del mismo, se procede a sincronizar el motor con la red de alimentación. Dicha maniobra, se efectúa cuando las dos ondas se encuentran en fase como lo muestra la figura 3.7 un instante antes de realizar la operación.

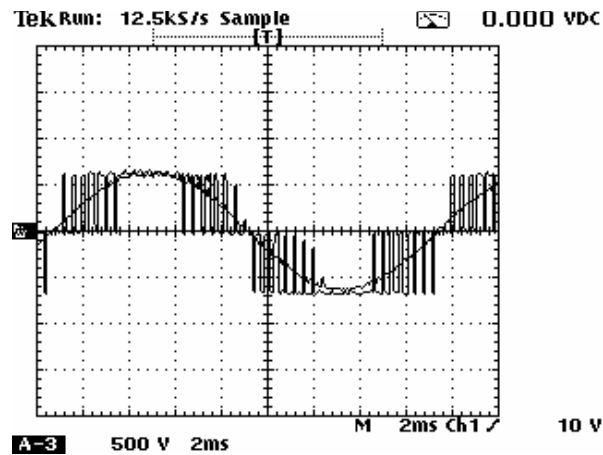


Figura 3.7 Ondas de voltaje en fase antes de la sincronización

Como se puede observar en la anterior figura, la diferencia de voltaje entre las dos fuentes en ese instante es muy cercana a cero., por lo que es posible realizar la maniobra seguramente en este instante. Cabe mencionar que las dos fuentes no se quedan conectadas en paralelo. Ya que el contactor de salida del variador, es puesto fuera de línea, un instante antes que el contactor 2, conectado a la red del sistema, entra en funcionamiento.

Luego de realizar la maniobra de sincronización, el motor queda alimentado de la red normal y como se observará en la siguiente figura, las ondas de voltaje dan la impresión de encontrarse en fase, ya que al salir de línea el variador, la medición del canal 1 del osciloscopio, se encuentra ahora también que el canal 2, a la red principal.

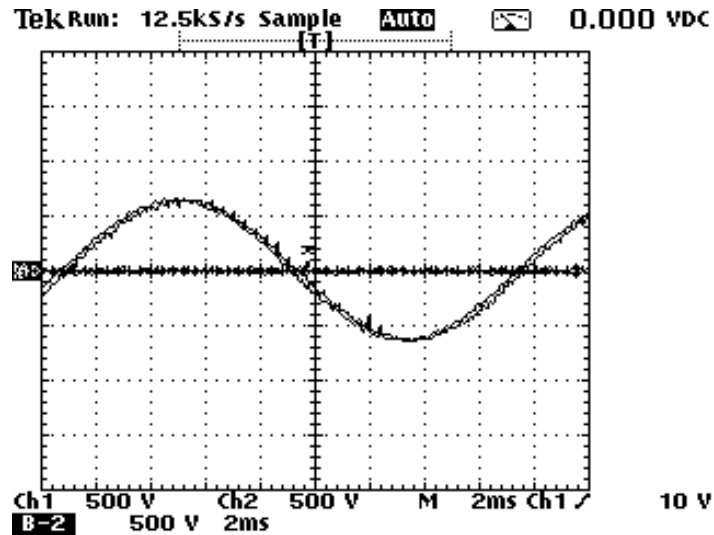


Figura 3.8 Ondas de voltaje en fase.

Durante la operación de sincronización, no existió ninguna distorsión en la onda de voltaje que alimentaba al motor, por lo que se puede concluir que el aislamiento eléctrico de los devanados del motor, no sufrirá daños por picos de voltaje en la maniobra.

No existió ningún problema con el variador de frecuencia al quitarle la carga instantáneamente, ya que todos los equipos modernos tienen protección por baja carga.

El propósito principal de esta simulación a escala es demostrar la posibilidad de sincronizar un motor eléctrico de inducción accionado por un variador de frecuencia a la línea de la red normal sin tener ningún problema. A la vez, se puede utilizar el variador de frecuencia como arrancador para varios motores eléctricos y así evitar picos de corriente en el arranque sin necesidad de la instalación de un arrancador para cada motor; aclarando que los motores trabajarán a su velocidad nominal.

Se podría decir también que al utilizar un sincronoscopio electrónico, se puede realizar la maniobra de sincronización de una forma más precisa y segura, ya que este tipo de aparatos se pueden programar para que gobiernen automáticamente el variador para llevarlos al punto en el que las diferencias de voltaje y frecuencia de las dos fuentes sea muy cercana a cero.

4. EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA

4.1 Análisis económico del proyecto

En la figura 4.1 se muestra el circuito de vapor para el área de molinos y que incluye un turbogenerador.

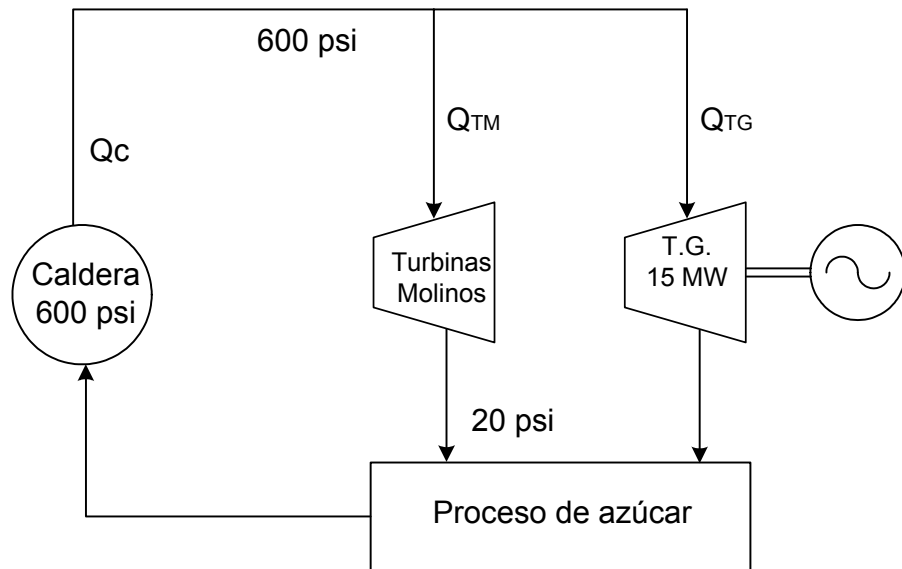


Fig. 4.1 Circuito de vapor en el área de molinos

Dicho circuito de vapor consta de una caldera de 200,000 Lb. / hora, cinco turbinas de molinos y un turbogenerador de 15 MW.

Según los datos de placa de las turbinas (para este caso son idénticas), consumen 23.96 Lb. – hora / HP a 600 psi y tienen una capacidad de 900 HP. Calculando el consumo de vapor en Lb. / h, se tiene que para:

$$q'_t = 23.96 \text{ Lb. / h / HP, y 900 HP}$$

$$Q_t = \text{HP} \times q'_t$$

$$Q_t = 900 \times 23.96$$

$$Q_t = 21,564 \text{ Lb. / h}$$

El consumo total de vapor para las cinco turbinas es entonces:

$$Q_{TM} = 5Q_t$$

$$Q_{TM} = 5 (21,564)$$

$$Q_{TM} = 107,820 \text{ Lb. / h}$$

De donde el consumo actual del turbogenerador es:

$$Q_{TG} = 200,000 - 107,820$$

$$Q_{TG} = 92,180 \text{ Lb/h}$$

Según los datos de placa del turbogenerador, para producir 1 KW se necesitan 13.2 Lb / h.

Tomando en cuenta que actualmente la capacidad de la caldera es de 200,000 Lb/h y que el área de turbinas necesita 107,820 Lb / h, el turbogenerador está utilizando entonces 92,180 Lb / h, lo que equivale a:

$$P_{TG} = \frac{92,180 \text{ Lb} / h}{13.2 \text{ Lb} / \text{Kw}}$$

$$P_{TG} = 6,983.33 \text{ Kw}$$

Analizando ahora para sustituir una turbina por un motor eléctrico de 900 HP se obtiene que:

$$900 \text{ HP} = 671.4 \text{ KW}$$

Entonces, para producir 671.4 KW con el turbogenerador:

$$Q_M = 671.4 \times 13.2$$

$$Q_M = 8,862.48 \text{ Lb.} / h$$

Calculando el ahorro de vapor que se tendría al sustituir la turbina por el motor, se tiene:

$$Q_{\text{AHORRO}} = Q_t - Q_M$$

$$Q_{\text{AHORRO}} = 21,564 - 8,862.48$$

$$Q_{\text{AHORRO}} = 12,701.52 \text{ Lb.} / h$$

De acuerdo al ahorro de vapor obtenido al sustituir la turbina por el motor, se calcula la producción de energía eléctrica en el turbogenerador al aprovechar dicho vapor:

$$KW_A = \frac{12,701.52Lb / h}{13.2Lb / Kw}$$

$$KW_A = 962.24 \text{ KW}$$

Sustituyendo para las cinco turbinas, la producción de energía eléctrica en el generador será:

$$KW_T = 5 KW_A$$

$$KW_T = 5 (962.24)$$

$$**KW_T = 4,811.2 KW**$$

De tal manera que, al sustituir las cinco turbinas, el turbogenerador estaría entregando:

$$P_T = P_{TG} + KW_T$$

$$P_T = 6,983.33 + 4,811.2$$

$$**P_T = 11,794.51 KW**$$

4.1.1 Costos de producción de vapor

Para producir 1 lb de vapor por hora a 600 Psi se necesita 2 lb de bagazo. El costo del bagazo en la industria azucarera es despreciable, ya que se puede decir que es un desecho de la caña.

El consumo de energía eléctrica para la operación normal de la caldera por día promedio, según la medición de ese circuito es:

46,500 Kwh.

El costo de la energía en temporada de zafra es de Q 0.98/ Kwh., lo que representa un costo de:

$$\text{C.E.} = 46,500 \times 0.98$$

$$\text{C.E.} = \text{Q } 45,570.00 \text{ por día}$$

Para el tratamiento del agua de alimentación se tienen los siguientes químicos incluyendo el costo por día:

Soda Líquida = 17.53 lb/día @ Q 0.97/lb = Q 17.00

Químico 237 = 10.00 lb/día @ Q 29.46/lb = Q 294.60

Químico 204 = 7.75 lb/día @ Q 20.34/lb = Q 157.64

Químico 271 = 5.00 lb/día @ Q 26.55/lb = Q 132.75

Químico 284 = 1.50 lb/día @ Q 27.38/lb = Q 41.07

Total Tratamiento Agua por día = Q 643.06

Para la mano de obra se obtiene de los siguientes datos:

Puesto	Salario día	Salario hora	Turno A	Turno B	Turno C
Operador caldera	Q 80.14	Q 10.02	Q 88.47	Q 118.52	Q 148.58
Auxiliar caldera	Q 44.93	Q 5.62	Q 53.26	Q 70.11	Q 86.96
Electricista	Q 77.99	Q 9.75	Q 86.32	Q 115.57	Q 144.81
Instrumentista	Q 80.14	Q 10.02	Q 88.47	Q 118.52	Q 148.58
Camequero	Q 46.55	Q 5.82	Q 54.88	Q 72.34	Q 89.79
Peon	Q 39.67	Q 4.96	Q 48.00	Q 62.88	Q 77.75
Costo total mano de obra			Q	1,673.80	

Tabla 4.1 Costos de mano de obra por día de operación en la caldera

Tomando en cuenta que la caldera produce:

$$Q_c = 200,000 \text{ Lb / h}$$

Entonces el costo para la operación de la misma en un día es:

$$\text{C.O.} = \text{Q } 45,570.00 + \text{Q } 643.06 + \text{Q } 1,673.80$$

$$\text{C.O.} = \text{Q } 47,886.86$$

Y el costo por hora es:

$$\text{C.O. /h} = \frac{\text{Q}47,886.86}{24h}$$

$$\text{C.O. /h} = \text{Q } 1995.29$$

De donde, el costo para producir 1 libra de vapor es:

$$\text{Costo vapor} = \frac{Q1,995.29 / h}{200,000\text{Lb} / h}$$

$$\text{Costo vapor} = Q 0.0099/\text{lb}$$

4.1.2 Costos de generación eléctrica

El costo de la generación de energía eléctrica, se tomará para el turbogenerador de 15 MW. Según los históricos, los costos de mantenimiento de los últimos dos años se muestran en la siguiente tabla:

AÑO	MES	COSTO
2003	ENE	Q 38.76
	FEB	Q 71.97
	MAR	Q 152.59
	ABR	Q 559.76
	MAY	Q 58.92
	JUN	Q 6,807.10
	JUL	Q 4,836.11
	AGO	Q 9,065.21
	SEP	Q 858.29
	OCT	Q 38,983.01
	NOV	Q 2,602.55
	DIC	Q 20,581.35
TOTAL 2003		Q 84,615.62
2004	ENE	Q 825.76
	FEB	Q 83.18
	MAR	Q -
	ABR	Q -
	MAY	Q 49,709.71
	JUN	Q 942.22
	JUL	Q 19,991.65
	AGO	Q 72,167.74
	SEP	Q 19,505.82
	OCT	Q 34,662.13
	NOV	Q 159,656.05
	DIC	Q 41,067.89
TOTAL 2004		Q 398,612.15

Tabla 4.2 Costo anual de mantenimiento turbogenerador 15 MW

El costo del vapor utilizado anualmente por el turbogenerador para su funcionamiento es:

$$CV = 92,180 \text{ lb/h} \times Q 0.0099/\text{lb} \times 24 \text{ h/d} \times 120 \text{ d}$$

$$\mathbf{CV = Q 2,628,236.16}$$

El costo de mantenimiento promedio anual del turbogenerador analizado es de:

$$Q 241,613.89$$

Tomando en cuenta que el promedio anual de generación de energía eléctrica para este turbogenerador es:

$$14,882,400.00 \text{ Kwh.}$$

Y el costo de la mano de obra anual de reparación y operación es:

$$Q 177,812.10$$

Finalmente, se tiene que el costo total para producir los 14,882,400.00 Kwh. :

$$CT = Q 241,613.89 + Q 177,812.10 + Q 2,628,236.16$$

$$\mathbf{CT = Q 3,047,662.15}$$

De donde el costo de 1 Kwh. es:

$$CE = \frac{Q\ 3,047,662.15}{14,882,400.00\ Kwh}$$

$$CE = Q\ 0.21/Kwh.$$

4.1.3 Costos de inversión del proyecto

El equipo necesario para la puesta en marcha del presente proyecto se muestra en la tabla 4.3.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO U.	COSTO TOTAL
MOTOR ELÉCTRICO 1200 HP	5	\$ 65,000.00	\$ 325,000.00
VFD 1200 HP	3	\$ 130,000.00	\$ 390,000.00
CCM 2.4 KV	2	\$ 70,000.00	\$ 140,000.00
TRAFO, 75 KVA AUXILIARES	1	\$ 16,000.00	\$ 16,000.00
CABLE MV-90 500 MCM	4800	\$ 11.00	\$ 52,800.00
CABLE MV-90 4/0	100	\$ 8.00	\$ 800.00
CABLE MV-90 2/0	600	\$ 5.50	\$ 3,300.00
A/C	1	\$ 17,000.00	\$ 17,000.00
TUBERÍA Y ACCESORIOS	1	\$ 20,000.00	\$ 20,000.00
MANO DE OBRA	1	\$ 26,000.00	\$ 26,000.00
MATERIALES OBRA CIVIL	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00
COSTO TOTAL PROYECTO			\$ 1,015,900.00

Tabla 4.3 Costo de equipo especial para puesta en marcha del proyecto propuesto

De acuerdo a las tablas anteriores, el costo total de la inversión es:

$$\text{Costo Inversión} = \text{US \$ } 944,900.00 + \text{US \$ } 71,000.00$$

$$\text{Costo Inversión} = \text{US \$ } 1,015,900.00$$

$$\text{Costo Inversión en moneda nacional} = \text{Q } 8,025,610.00$$

Al tipo de cambio actual Q 7.8 por US \$ 1.00

Entonces:

$$\text{Inversión} = \text{US \$ } 1,015,900.00$$

$$\text{Costo generación} = 4,811.2 \text{ Kw.} \times 24 \times 120 \times \text{Q } 0.21 / \text{Q } 7.8 / \text{US \$ } 1.00$$

$$\text{CG} = \text{US \$ } 373,053.05$$

$$\text{Costo de venta de energía} = \text{US \$ } 0.07$$

$$\text{Producción energía} = 4,811.2 \text{ Kw/h.} \times 24\text{h/d} \times 120\text{d} \times \text{US \$ } 0.07$$

$$\text{Producción energía} = \text{US \$ } 969,937.92$$

$$\text{Utilidad} = \text{US \$ } 969,937.92 - \text{US \$ } 373,053.05$$

$$\text{Utilidad Neta} = \text{US \$ } 596,884.87$$

Tiempo de recuperación = US \$ 1,015,900.00 / US \$ 596,884.87

Tiempo de recuperación = 1.7 años

TR = 2 años

4.2 Análisis Costo Beneficio del proyecto

El principio de costo-beneficio establece que el valor es creado cuando el beneficio de una decisión excede su costo. El valor financiero es creado por medio de la influencia de tres variables:

- El flujo de efectivo
- El tiempo
- El riesgo

Las decisiones financieras se encuentran íntimamente relacionadas con el valor del dinero a través del tiempo.

Los valores determinan la oportunidad de flujos futuros de efectivo que se vayan a recibir. Los fondos que se reciban en el próximo año, valen más que el mismo monto cuando éste se recibe en el quinto o en el décimo año. La mayoría de las decisiones financieras, tanto a nivel personal como a nivel de los negocios, deben tomar en cuenta el valor del dinero a través del tiempo.

Resumiendo los datos anteriores, se construye la siguiente tabla de flujo de efectivo para un período de 3 años:

P	Año 1	Año 2	Año 3
\$ (1,015,900.00)	\$ 595,495.38	\$ 595,495.38	\$ 595,495.38

Tabla 4.4 Flujos de efectivo

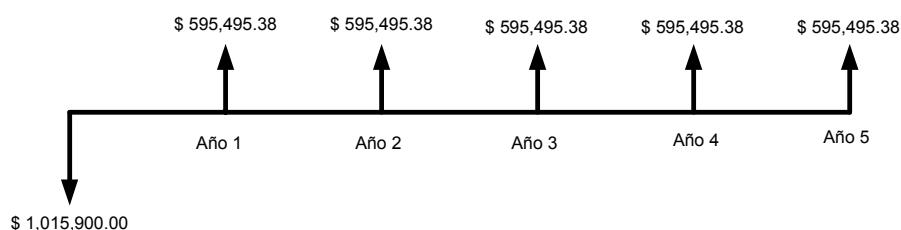


Figura 4.2 Diagrama de flujo de efectivo del proyecto

4.2.1 El Valor Presente Neto

El valor presente neto VPN, es la diferencia entre el valor presente del flujo de efectivo de un proyecto y su inversión. O bien, es la diferencia entre beneficios y costo. Un valor positivo del VPN en un proyecto implica que el valor presente del flujo de efectivo que genera el proyecto excede el valor de la inversión. El valor o beneficio creado por un proyecto es igual al valor presente neto VPN.

El VPN se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$VPN = -I + \sum_1^n \frac{Ct}{(1+r)^t}$$

Donde:

I = Inversión

N = Número de años de pagos de efectivo

r = Tasa de descuento o interés en el tiempo t

Ct = Pago o flujo de efectivo en el tiempo t

t = Número correlativo de pago en el tiempo

Para el presente proyecto se tiene que para 2 años:

I = US \$ 1,015,900.00

N = 2

R = 15% (tasa actual para depósitos a plazo fijo en sistema bancario)

Ct = US \$ 596,884.87

T = 2

De la ecuación para VPN se tiene:

$$VPN = -1,015,900.00 + \sum_1^2 \frac{596,884.87}{(1+0.15)^{2t}}$$

Resolviendo la ecuación:

$$VPN = -47,797.86$$

Dado el resultado anterior, el valor negativo indica que para 2 años el proyecto no es viable. Analizando ahora para 3 años se tiene que:

$$VPN = -1,015,900.00 + \sum_1^3 \frac{596,884.87}{(1+0.15)^3}$$

Resolviendo nuevamente la ecuación, se tiene:

$$\mathbf{VPN = 343,750.02}$$

Este resultado muestra que el proyecto si es factible para un período de 3 años.

4.2.2 La tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno es la tasa de descuento o interés que vuelve al valor presente neto igual a cero, en una serie determinada de flujo de efectivo. Para calcularla se emplea la siguiente ecuación:

$$0 = -I + \sum_1^n \frac{Ct}{(1+IRR)^t}$$

Donde:

IRR = Tasa Interna de Retorno

Calculando ahora la tasa interna de retorno para el proyecto, se tiene para la ecuación :

$$0 = -1,015,900.00 + \sum_1^2 \frac{595,495.38}{(1+IRR)^3}$$

Resolviendo la ecuación, se tiene:

$$\mathbf{IRR = 35\%}$$

Esta tasa es superior a la del sistema bancario. Que indica el interés con el cual retorna la inversión de \$1,015,900.00

Como se verá esta tasa es mayor a la actual en los bancos (15%).

Por lo tanto, se puede observar que el proyecto es rentable en un plazo de 3 años.

CONCLUSIONES

1. La disposición de utilizar, únicamente, tres variadores de frecuencia para el arranque de cinco motores se basó en que para el primer y último molino de caña se necesita un control estricto de la velocidad de los mismos para uniformizar la extracción del jugo primario de la caña en el primero y para reducir la humedad del bagazo en el último molino. Los molinos intermedios trabajan a velocidad constante por lo que al utilizar los mismos variadores de frecuencia para el arranque de los motores intermedios es una opción para el ahorro de arrancadores para dichos motores. El tercer variador se tendría como una opción de reserva a la hora de fallar cualquiera de los otros dos.
2. Se demostró que el proyecto de instalación tiene buenos resultados económicos. Al aumentar la generación eléctrica de un 46% inicial a un 78% de la capacidad del generador, origina un excedente de producción de energía eléctrica que será proporcionado a la empresa distribuidora de energía eléctrica, en este caso: la Empresa Eléctrica de Guatemala (EEGSA) y será rentable a partir del tercer año, y que, la tasa interna de retorno es mayor que las vigentes, actualmente, en el mercado bancario nacional y que oscila entre 13% y 15%.
3. La implementación del uso de variadores de frecuencia para el accionamiento de motores eléctricos de inducción en las industrias, va aumentando, cada día, debido a las ventajas que se pueden obtener, entre las cuales se puede mencionar: accionar al motor eléctrico, siempre con sus características de diseño nominales, máximo torque y mínimas pérdidas; y también, ajustar la velocidad y el torque del motor eléctrico al

valor requerido por la carga mecánica con máxima exactitud y mínimo tiempo de retardo.

4. La robustez y menor costo del motor de inducción lo han transformado en el motor estándar para aplicaciones industriales. El motor de inducción posee una eficiencia promedio de 95%, lo cual lo hace más rentable, comparado con una turbina de vapor que posee una eficiencia promedio de 60%.

5. El desarrollo de los accionamientos en media tensión es nuevo y existen diferentes topologías para su implementación. Entre las principales se encuentra la fuente de voltaje y la fuente de corriente. La principal desventaja de la topología fuente de corriente es que el factor de potencia varía con la velocidad del motor, mientras que en la topología fuente de voltaje el factor de potencia se mantiene constante.

RECOMENDACIONES

1. Es recomendable el reemplazo de las turbinas de vapor, en el área de molinos tándem “B” del ingenio Santa Ana, por motores eléctricos de inducción, accionados por variador de frecuencia, pues, se demostró, técnicamente, su factibilidad y rentabilidad, además de eficientar el proceso de molienda en la producción de azúcar.
2. Para tener un control preciso en el área de molienda, es necesario que los variadores de frecuencia instalados en el primer y último molino sean automatizados, ya que, con esto el variador ajustará en el motor la velocidad y torque necesarios dependiendo de las condiciones de operación que se requieran.
3. El uso de variadores de frecuencia para accionamiento de los motores eléctricos, se puede extender para todos los equipos, en general, que relación con el proceso y la fabricación del azúcar. Por lo tanto, se recomienda utilizarlos en otras áreas en donde se necesite eficientar el proceso, como lo es el área de calderas, en donde sería de gran ayuda utilizar variadores de frecuencia, para controlar el flujo de aire inducido y forzado de las mismas y reemplazar los actuales controles mediante dampers.
4. Para aplicaciones de media tensión, se recomienda utilizar variadores de frecuencia fuente de voltaje, pues, una de las principales ventajas, respecto a la fuente de corriente, es que mantiene el factor de potencia en el motor, lo cual lo hace más eficiente para su operación. Además, es recomendado, también, que su parte ondulatoria sea integrada por IGBT's ó IEGT's, pues, estos dispositivos poseen la velocidad más alta de conmutación, son

operados por pulsos de voltaje, por lo que sus pérdidas por conmutación son inferiores a los IGCT.

5. Cuando se requiera un motor eléctrico para accionarlo con variador de frecuencia, es indispensable, además de todas las otras características como voltaje, potencia y velocidad, se especifique el aislamiento tipo Inverter Duty. Este tipo de aislamiento permite a los bobinados del motor, soportar los picos de voltaje de las ondas de salida de los variadores de frecuencia.

6. Para aplicaciones en donde se requiera utilizar motores mayores o iguales a 250 HP en baja tensión, es recomendable utilizarlos en media tensión, ya que, al incrementar el voltaje, disminuye la corriente y al mismo tiempo las pérdidas por efecto Joule.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABB. **A guide to Standard medium voltage variable speed drives.**
[http://: www.abb.com](http://www.abb.com).
2. Avallone, Eugene. **Manual del ingeniero mecánico.** México, 9ª Edición, 1996.
3. Blackburn, J. Lewis. **Protective Relaying, principles and applications.** New York, 2ª Edición, 1998.
4. Chapman, Stephen. **Máquinas eléctricas.** México, 2ª Edición, 1995.
5. Fink, Donald G. **Manual de ingeniería eléctrica.** Colombia, 13ª Edición, 1997.
6. Fitzgerald, A. **Máquinas eléctricas.** México, 5ª Edición, 1992.
7. Hall, Allen. **Teoría y problemas de diseño de máquinas.** Colombia, 2ª edición, 1975.
8. Hicks, Tyler G. **Manual de cálculos para las ingenierías.** México, 3ª edición, 1998.
9. Hugot, E. **Manual para ingenieros azucareros.** México, 1ª Edición, 1984.
10. Leonhard, Reglerbau. **Three Phase Synchronizing System.** Berlín, 2000.

11. Merino Azcárraga, José María. **Convertidores de frecuencia para motores de corriente alterna**. España, 1ª Edición, 1998.
12. Morán, Luis. **Seminario Variadores de frecuencia para el control de motores eléctricos en media tensión**. Guatemala, 2005.
13. Park, Chan. **Ingeniería económica contemporánea**. USA, 1ª Edición, 1997.
14. Severns, W. H. **Energía mediante vapor, aire o gas**. México, 5ª Edición, 1997.
15. Stevenson, William. **Análisis de sistemas de potencia**. México, 1ª Edición, 1997.
16. Toshiba, G. E. **Médium Voltaje Drive Evolution Seminary**. Guatemala, 2003.

APÉNDICE A

Impacto de ahorro de energía, utilizando un variador de frecuencia como accionamiento de un motor de inducción

El impacto de usar accionamientos de velocidad variable en el ahorro de energía se ilustra el siguiente ejemplo de la figura A1

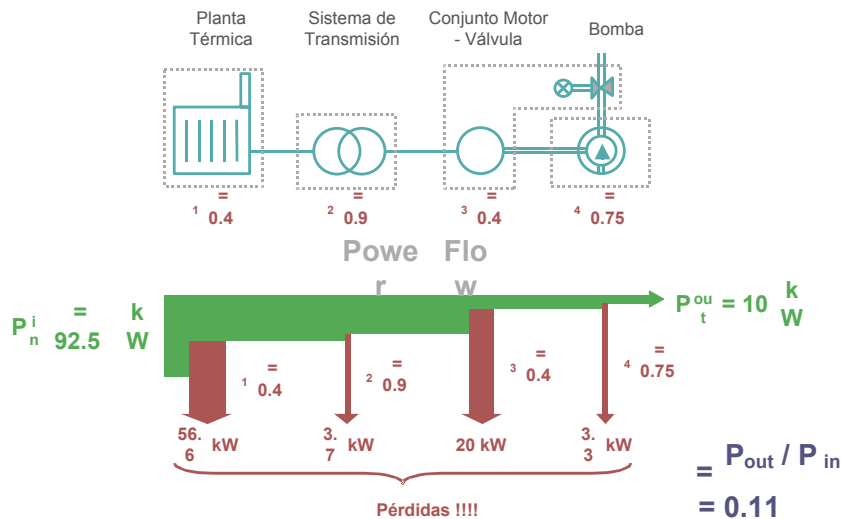


Figura A1 Eficiencias de varios sistemas.

En el ejemplo anterior, se pretende variar el flujo de la bomba mediante la estrangulación de la válvula. Debido a que el motor entrega constantemente su potencia, este sistema es muy ineficiente, como se podrán observar sus rendimientos individuales. Como se pudo observar, para entregar 10 Kw a la salida de la bomba, es necesario producir 92.5 Kw en la planta térmica, lo que significa que se tienen 82.5 Kw de pérdidas desde la planta hasta la bomba.

Al reemplazar el conjunto motor-válvula por el conjunto motor-variador, se tiene un considerable aumento de eficiencia en el sistema. Ver figura A2.

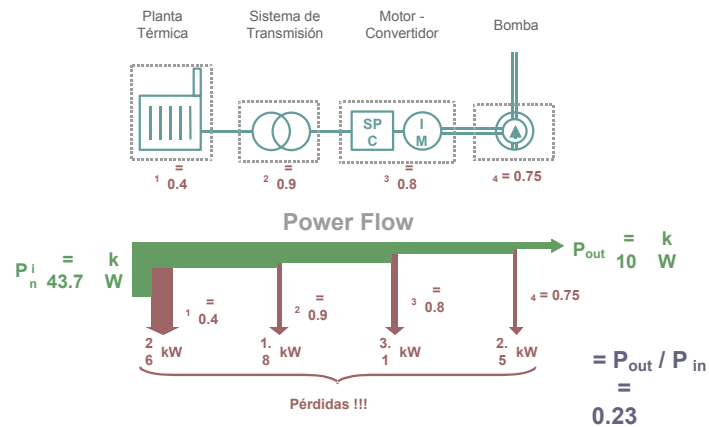


Figura A2 Sistema mejorado.

Como se podrá observar, el aumento en la eficiencia del sistema contribuye a reducir las pérdidas totales. Para entregar 10 Kw a la salida del motor, es necesario producir 43.7 Kw en la planta térmica.

Comparación entre variadores con IEGT e IGCT

Una de las principales diferencias entre variadores que utilizan IECT, IGBT mejorado, y los que utilizan IGCT se muestra en la figura A3

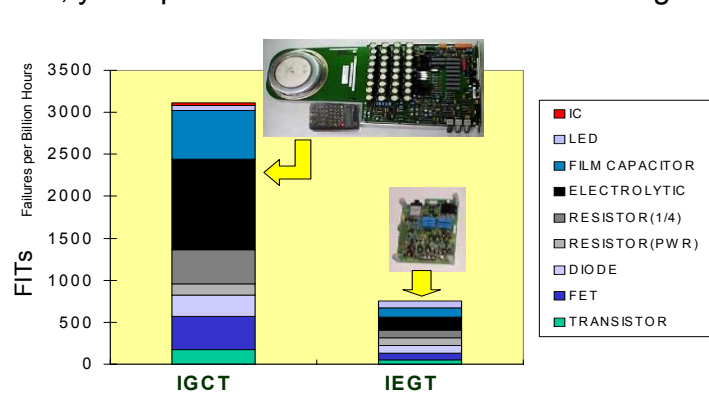


Figura A3 Comparación del número de fallas entre el IGCT y el IECT

APÉNDICE B

Consideraciones para la selección de un motor eléctrico de inducción a ser utilizado con variador de frecuencia

El voltaje de salida y las formas de onda producidos por los variadores de frecuencia PWM son una fuente de la preocupación especial por las tensiones puestas en sistemas del aislamiento del motor. Las formas de onda del PWM contribuyen a los esfuerzos térmicos, a la vibración y a los esfuerzos dieléctricos. Mientras los VDF PWM han estado en uso, estos esfuerzos se han reconocido generalmente como factores en seleccionar y solicitar los motores para uso con VDF PWM. Los avances recientes en tecnología de los variadores, sin embargo, han aumentado el impacto de ciertos elementos de los esfuerzos dieléctricos.

Forma del pulso de salida

La figura B1 muestra tres (3) ejemplos de una vista agrandada de un solo pulso de una forma de onda típica de la salida de un PWM. Al principio del pulso, el voltaje se levanta rápidamente a partir de la cero (0), llega más allá a un pico y después se coloca de nuevo a la altura de pulso normal, que es igual al voltaje de DC rectificado. Observe que puede estar cerca del voltaje Overshoot y puede oscilar antes de colocarse de nuevo a la altura de pulso normal. El tiempo de subida, los dv/dt y el voltaje máximo total, incluyendo el Overshoot son muy importantes en nuestra consideración de la tensión del voltaje del aislamiento del motor.

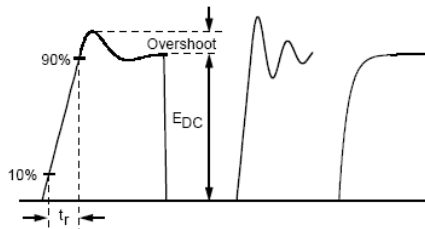


Figura B1 Forma típica del pulso de salida en un VDF PWM

Tiempo de subida (t_r), dv/dt y voltaje pico

El tiempo de subida mostrado como t_r en la figura B1, se define generalmente como el tiempo requerido del voltaje para levantarse a partir la 10% al 90% del voltaje máximo. El dv/dt es la pendiente de subida del voltaje en voltios por microsegundo (μs). El dv/dt puede ser aproximado como 80% del voltaje máximo dividido por el tiempo de subida.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\text{Voltaje Pico} \times 0.8}{t_r} \quad (1)$$

El tiempo de subida es determinado sobre todo por las características de la conmutación de los dispositivos de conmutación del inversor, transistores, IGBTs o GTOs del darlington, y de los componentes asociados. Otros factores que pueden influenciar el tiempo de subida y la altura del voltaje Overshoot, incluyen la corriente de carga y el diseño de la construcción de la circuitería del variador. Algunos aspectos significativos del diseño de la circuitería del variador son el diseño de circuito snubber y la resistencia interna, la inductancia y la capacitancia internas de todos los componentes, cableado y elementos

mecánicos del circuito. Las características del cable del motor pueden, también, influenciar la forma de pulso de la salida. Considerando varias marcas de fábrica y modelos de variadores, el tiempo de subida es típicamente 0.1 μs para variadores usando la tercera generación de IGBTs. La primera generación IGBTs tenía tiempos de subida de 0.25 μs . Los variadores que usan los transistores bipolares ordinarios tienen típicamente tiempos de subida en el 0.5 y 1.5 μs . Los variadores que utilizan GTOs tienen típicamente tiempos de subida entre los 15 y 20 μs . Los variadores que todavía usan los rectificadores controlados de silicio (SCRs) tienen tiempos de subida en la orden de 40 a 100 μs .

Pulsos de voltaje reflejados en las terminales del motor

Cuando las ondulaciones viajan a través de una charca y alcanzan barrera, se reflejan detrás de la barrera y se combinan con la ondulación entrante. De una manera similar, una onda del voltaje que viaja en una línea transmisión se refleja de vuelta de la transición entre la impedancia de la línea y la impedancia de la carga en el extremo de la línea. Si la impedancia de la carga es igual a la impedancia característica de la línea, no hay onda reflejada. Si hay una diferencia grande en impedancia, la amplitud de la onda reflejada acercará a la amplitud de la onda de la original o incidente. Una reflexión positiva ocurre si la impedancia de la carga es mayor que la línea impedancia.

Los conductores que conectan un motor con un controlador PWM, actúan como una línea de transmisión. Puesto que la impedancia característica del cable de un motor es típicamente menos que la impedancia característica del motor, la clásica línea de transmisión teórica, predice que una reflexión del voltaje ocurrirá en el extremo del cable del motor. La impedancia característica es significativamente menor para motores más grandes que para motores más

pequeños mientras que hay una gama más pequeña de los valores para las impedancias típicas del cable. Esto significa que la magnitud del voltaje reflejado es significativamente menor para motores más grandes con respecto a motores más pequeños.

Aunque el pulso de salida que viaja del variador PWM al motor lo hace alrededor de la mitad de la velocidad de la luz, es posible que el tiempo requerido de un pulso para alcanzar el motor puede ser más que mitad del tiempo de subida del pulso. Éste es el caso cuando la longitud del cable del motor es mayor que o igual a la longitud crítica. La longitud crítica se puede estimar como una mitad (el 1/2) de la velocidad en que el pulso viaja del inversor al motor multiplicado por el tiempo de subida.

$$L_{critica} \text{ (pies)} = \frac{V_{cable} \times t_r (\mu s)}{2} \quad (2)$$

Donde:

V_{cable} = Es la velocidad de propagación del pulso cuando viaja del variador al motor en pies por μs . El valor de V_{cable} depende del tipo de cable, el tipo de tubería conduit o bandeja para instalación del cable y es estimado como 500 pie/ μs .

Los valores típicos de la longitud de cable crítica pueden ser 25 a 200 pies para el variador tipo IGBT, 150 a 400 pies para los variadores usando los transistores bipolares ordinarios y 750 a 2500 pies para el variador tipo GTO.

Estas estimaciones se basan en $V_{\text{cable}} = 500 \text{ pie}/\mu\text{s}$ y los tiempos de subida previamente mencionados que sean típicos para las varias marcas de fábrica y modelos de la impulsión.

Para longitudes de cable más de largo que la longitud crítica, la línea teoría de transmisión predice que los puntos de voltaje máximo ocurrirían en las longitudes de cable que son múltiplos de la longitud crítica. En las longitudes intermedias, los puntos "nulos" deben ser encontrados donde está el menor voltaje que el máximo. Sin embargo, el cable y la forma de onda no son suficientemente uniformes para permitir que la longitud de cable "atenuada" para colocar el motor en un punto "nulo" donde no ocurrirían los picos de alto voltaje. Además, el efecto combinado de los pulsos y del sonido de voltaje reflejados da lugar a un aumento continuo en voltaje según lo descrito abajo.

Ruido

La inductancia y la capacitancia del cable, del motor y del circuito de salida del inversor, pueden constituir un circuito resonante que pueda causar que los bordes de los pulsos de voltaje no sean uniformes y asumir la existencia de una forma de onda de ruido. Combinado con los fenómenos de la reflexión del voltaje, este ruido puede dar lugar a los picos del voltaje que están considerablemente más que dos veces el voltaje del bus del inversor.

Para las longitudes de cable más de largo que la longitud crítica, el voltaje máximo continúa aumentando en forma reducida. En longitudes de cable más largas, el índice del aumento del voltaje contra longitud de cable también es influenciado por la frecuencia de la conmutación.

Efectos en el aislamiento del motor

Los altos picos de voltaje corta duración crean los esfuerzos que pueden hacer el aislamiento del motor deteriorar y fallar. El tiempo de subida o el dv/dt es de preocupación porque el tiempo de subida corto o los altos valores de dv/dt hace que los picos del voltaje sean distribuidos irregularmente a través de las bobinas del motor. Con dv/dt alto, hasta el 85% del voltaje pueden aparecer entre las primeras y segundas vueltas de la bobina.

Descarga Parcial

La descarga parcial de cada pico de voltaje puede causar una pequeña avería llamada descarga parcial (DP) en cualquier vacío llenado de aire en el material del aislamiento. Las averías repetidas de la DP destruyen gradualmente el aislamiento. La reducción de la frecuencia de la conmutación del inversor retarda el índice de la deterioración pero no lo elimina, porque la deterioración es más una función del tiempo de subida contra la repetición. La deterioración es eliminada solamente asegurando que la amplitud de los picos del voltaje sea menor que el voltaje del inicio de la DP del aislamiento del motor. La deterioración del aislamiento puede, también, causar un esfuerzo dieléctrico de la capa aislador del alambre.

Descarga Corona

La descarga corona ocurre cuando el aire es ionizado por el campo eléctrico entre las bobinas. La corriente no atravesará el aire ionizado mientras el aislamiento del material permanezca intacto, pero el aire ionizado puede hacer que los materiales aisladores se deterioren. El voltaje, en el cual la descarga corona ocurre, es reducido aumentando la temperatura y humedad y

por los contaminantes en el aire o en la superficie de las bobinas. Esto se debe tener presente cuando se considera el uso de un motor a prueba de goteo donde el motor puede estar sujeto a los voltajes pico y el ambiente puede siempre no ser fresco, limpio y seco.

Los requisitos especiales de los sistemas del aislamiento de los motores para el PWM pueden ser cuantificados lo mejor posible especificando el voltaje y el dv/dt máximos en los terminales del motor. Desafortunadamente, el voltaje y el dv/dt máximos no se pueden determinar exactamente de las características del PWM. Incluso con una longitud sabida del cable entre el inversor y el motor, puede haber significativa diferencia en las características del cable a partir de una instalación a otra. El tipo y el tamaño del alambre, el tipo y el tamaño del conducto y las características del motor influyen en el resultado. Los varios fabricantes están procurando definir los requisitos realistas del aislamiento del motor que asegurarán la operación confiable en la mayoría de las circunstancias de la instalación sin excesivamente el aumento del coste del motor.

Debido a lo anterior, actualmente, en el mercado se encuentran los motores denominados “Inverter Duty”, que son, exclusivamente, para ser accionados con variadores de frecuencia debido al tipo de aislamiento reforzado, el cual soporta todos los picos repetitivos de voltaje, sin que se deteriore el aislamiento. Este tipo de motores están fabricados bajo la norma NEMA MG 1-1993.

Restricciones para la estimación de la longitud del cable

La tabla B1 proporciona las estimaciones para las longitudes de cable máximas del motor que se deben observar para reducir al mínimo el riesgo del

daño del aislamiento del motor, debido a los esfuerzos de voltaje. Las longitudes de cable se enumeran, para los varios niveles de la capacidad máxima del voltaje con y sin los filtros de dv/dt. Las capacidades máximas mencionadas del voltaje son: los voltajes pico, el cual los motores deben soportar en un tiempo de subida de 0.1 μ s, y una frecuencia de la conmutación de 3 KHz. El aislamiento del motor debe soportar estos voltajes pico continuamente para un tiempo de vida de funcionamiento normal. El nivel de la capacidad 1000V es el mínimo que se debe considerar para el uso con variador de frecuencia. Si un motor con un nivel más bajo de la capacidad está conectado con un variador PWM, puede tener una vida de servicio limitada. Cuando son nuevos, muchos motores estándar de buena calidad tienen una capacidad máxima del voltaje de 1200V a 1300V.

	480 Volt Motors						600 V Motors	
	1000 V Peak Withstand		1200 V Peak Withstand		1600 V Peak Withstand		1600 V Peak Withstand	
	Output Reactor	dv/dt Filter	Output Reactor	dv/dt Filter	Output Reactor	dv/dt Filter	Output Reactor	dv/dt Filter
Up to 60 HP	>25 ft.	>200 ft.	>40 ft.	>200 ft.	>375 ft.	>600 ft.		Any Length.
60 - 150 HP	>40 ft.	>200 ft.	>150 ft.	>200 ft.	>375 ft.	>600 ft.		Any Length
Over 150 HP	>40 ft.	>200 ft.	>250 ft.	>300 ft.	>375 ft.	>600 ft.		Any Length

Tabla B1 Máxima longitud de cable recomendada para el motor