

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**Evaluación del parámetro rendimiento bajo Std. IEEE 739  
en sistemas de bombeo de agua potable para motores  
trifásicos de inducción accionados por variadores de  
velocidad.**

PRESENTADO POR:

**MARIO ERNESTO BOJORQUEZ FLORES**

**JORGE EDUARDO GABRIEL HUIZA DERAS**

**WILLIAM ALCIDES RIVAS GARCÍA**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2015

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR :**

**MSc. e ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título :

**Evaluación del parámetro rendimiento bajo Std. IEEE 739  
en sistemas de bombeo de agua potable para motores  
trifásicos de inducción accionados por variadores de  
velocidad.**

Presentado por :

**MARIO ERNESTO BOJORQUEZ FLORES**

**JORGE EDUARDO GABRIEL HUIZA DERAS**

**WILLIAM ALCIDES RIVAS GARCÍA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

San Salvador, Septiembre 2015

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, Martes 1 de septiembre de 2015, en la Sala de Reuniones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:30 pm horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. MSc. e Ing. José Wilber Calderón Urrutia  
Director

Firma:

Wilber Calderón

2. MSc. e Ing. Salvador de Jesús Germán  
Secretario

Firma:

[Firma]



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- Ing. Armando Martínez Calderón

2- Msc. Luis Roberto Chévez Paz

3- Ing. José Miguel Hernández

Firma:

[Firma]  
[Firma]  
[Firma]

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

Evaluación del parámetro rendimiento bajo Std. IEEE 739 en sistemas de bombeo de agua potable para motores trifásicos de inducción accionados por variadores de velocidad.

A cargo de los Bachilleres:

- Bojorquez Flores Mario Ernesto
- Huiza Deras Jorge Eduardo Gabriel
- Rivas García William Alcides

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.1

(nueve punto uno )

## AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecerle en primer lugar a Dios por haberme cuidado todos estos años en los que viaje a la universidad, también quiero agradecerle por haberme dado la facilidad y la sabiduría de poder asimilar mucho de lo que aprendí en la carrera. A Él sea la gloria y la honra.

En segundo lugar agradecerles a mis padres Mario Ernesto Bojorquez Oviedo y Sonia del Transito Flores de Bojorquez por toda la sabiduría, paciencia, consejos y toda la enseñanza que como padres han podido darme en los años de mi vida. A mi hermano menor Guillermo José Bojorquez Flores por estar ahí apoyándome, aun y cuando no supiera que estaba haciendo pero su solidaridad es de resaltar en toda esta consecución de mi carrera, solo puedo decirles a mi familia: muchísimas gracias por todo.

También pero no menos importantes quiero agradecerles a muchas personas que con sus consejos, experiencias, etc. fueron de vital importancia en esta carrera. A la Lic. Flor de María Villalta de Cubias por su confianza en que lograría obtener mi carrera y a mi novia Stefany Janeth Cortez Coreas por todo su apoyo, sacrificios.

A mis compañeros de tesis Jorge Huiza y William Rivas que con su apoyo y dedicación pudimos sacar adelante todo este estudio y pues dicho sea de paso puedo decir que formamos el mejor grupo de trabajo en el que he podido estar.

A todos los compañeros de carrera que estuvieron luchando, estudiando y que ya hay muchos que se graduaron que no se mencionan acá, pero que tuve el privilegio de compartir aula, a todos ellos mis agradecimientos.

Mario Ernesto Bojorquez Flores.

## AGRADECIMIENTOS.

Agradezco principalmente a Dios por darme la vida y hacer posible todo lo que hacemos, luego a mis padres Jorge Alberto y Marta Eugenia que me han apoyado siempre de manera incondicional durante todas las etapas de mi vida y decirles que los amo.

Quiero agradecer a mis compañeros y amigos que me acompañaron durante toda la carrera de ingeniería eléctrica, mis amigos de tesis Mario Bojorquez y William Rivas, también a mis amigos que no son de la Universidad y de algunas forma me apoyaban, los docentes de la EIE que contribuyen a nuestra formación como ingenieros, nuestro asesor de trabajo de graduación que nos orientó de la mejor manera.

También quiero agradecer a los ingenieros del personal de ANDA que nos apoyaron con la logística en la visita a la estación de bombeo, las muchas veces que fuimos, pusieron a disposición su tiempo y sus ganas de colaborar con nuestro estudio.

Finalmente, quiero agradecer a dos empresas que nos ayudaron en nuestro estudio, ESINSA y SETISA, esta última nos patrocinó el estudio de calidad de energía con el préstamo de su equipo, hacer el tiempo de recibirnos, colaborarnos y hacer posible la etapa de mediciones.

Jorge Eduardo Gabriel Huiza Deras.

## AGRADECIMIENTOS.

Toda historia tiene un gran final, pero en la vida un final es el comienzo de algo nuevo, nunca tenemos un final concreto, es un vivir constante de aprendizaje es parte de nuestra naturaleza.

Agradezco a Dios, por regalarme la vida, las ganas y la voluntad de enfrentar cada reto, cada prueba que se presentó durante la formación académica en la universidad. Agradezco este éxito a mi familia mi madre María de Rivas y a mis hermanos gracias por su apoyo.

Especialmente a mi padre Walter Rivas Villanueva, sin su apoyo incondicional y el esfuerzo que hizo para poder brindarme la educación superior no habría sido posible lograr esto, fue mi principal fuente de inspiración, por sus palabras de aliento, confianza, paciencia y sobre todo gracias por su apoyo incondicional creer en mí.

A mis compañeros amigos de tesis Jorge Huiza y Mario Bojórquez, luchamos muchas batallas difíciles y al final logramos nuestro propósito y a seguir adelante y gracias al Ing. Armando Calderón por su asesoría y consejos en el desarrollo de este trabajo de graduación.

Josué Arana, Edgar Menjivar, Gerson Álvarez y a todos mis amigos, que con quien nos aventuramos, crecimos y compartimos muchas experiencias que marcaron esta etapa de nuestras vidas y hay que seguir creciendo.

William Alcides Rivas García.

## INDICE DE CONTENIDO.

INTRODUCCION.	18
OBJETIVO GENERAL.	19
OBJETIVOS ESPECIFICOS. ....	19
<b>CAPITULO 1.</b>	<b>20</b>
1    CONCEPTOS BÁSICOS ACERCA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.	20
1.1    DESARROLLO DEL PAR INDUCIDO. ....	20
1.2    CONCEPTO DE DESLIZAMIENTO. ....	21
1.3    FRECUENCIAS ELÉCTRICAS EN EL ROTOR. ....	22
1.4    ECUACIÓN DEL PAR INDUCIDO EN MOTORES DE INDUCCIÓN. ....	23
1.5    CLASES DE DISEÑO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN. ....	27
1.5.1    DISEÑO CLASE A. ....	28
1.5.2    DISEÑO CLASE B. ....	28
1.5.3    DISEÑO CLASE C. ....	28
1.5.4    DISEÑO CLASE D. ....	29
2    CONTROL DE VELOCIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN.	29
2.1    CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR MEDIANTE EL CAMBIO DE POLOS. .....	30
2.2    CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO DE FRECUENCIA DE LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN. ....	33
2.3    CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO EN LA TENSIÓN DE LÍNEA. ....	37
2.4    CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE CAMBIO DE LA RESISTENCIA DEL ROTOR. ....	38
3    BOMBAS CENTRIFUGAS.	39
3.1    CARGA Y CURVAS DE CARGA DEL SISTEMAS. ....	40
3.2    CARGA DEL SISTEMA. ....	41
3.3    CARGA ESTÁTICA. ....	41
3.4    CARGA DE FRICCIÓN. ....	43
3.5    PERDIDAS EN LA ENTRADA Y SALIDA. ....	43
3.6    CURVAS DE FRICCIÓN Y DE CARGA DEL SISTEMA. ....	43

3.7	VARIACIONES EN EL FLUJO DESEADO. ....	45
4	LEYES DE AFINIDAD Y CURVAS DE CAPACIDADES NOMINALES.	46
4.1	LEYES DE AFINIDAD.....	48
	<b>CAPITULO 2.</b>	50
1	EL VARIADOR DE VELOCIDAD (VSD)	50
2	FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DE LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DE VELOCIDAD EN MOTORES.	52
3	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.	52
4	FUNCIONES DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.	53
5	PRINCIPALES TIPOS DE VARIADORES DE VELOCIDAD.	53
5.1	RECTIFICADOR CONTROLADO. ....	53
5.2	CONVERTIDOR DE FRECUENCIA. ....	53
5.3	REGULADOR DE TENSIÓN.....	54
5.4	VARIADORES ELÉCTRICOS - ELECTRÓNICOS .....	54
5.5	VARIADORES PARA MOTORES DE CC: .....	54
6	VARIADORES PARA MOTORES DE CA CONOCIDOS COMO VARIADORES DE FRECUENCIA.	54
7	CONSIDERACIONES PARA LA ELECCIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD.	55
7.1	RESUMEN PARA ELECCION DEL VARIADOR DE VELOCIDAD .....	58
8	¿CUÁL ES EL TIPO DE CARGA EN LA QUE SE IMPLEMENTARA LA MAQUINA?	58
9	¿LA APLICACIÓN ES UN NUEVO PROYECTO O SE TRATA DE AUTOMATIZAR UNA APLICACIÓN YA EXISTENTE?	59
10	¿ES NECESARIO EL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA APLICACION INDUSTRIAL?	60
11	ESTABLECIENDO EL RANGO DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD EN FUNCIÓN DE LA CARGA Y EL MOTOR.	61
12	CUAL ES EL CICLO DE TRABAJO.	61
13	DATOS DE PLACA NOMINALES DEL MOTOR.	62
14	DATOS NOMINALES DE LA RED ELECTRICA.	62
15	CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES DE OPERACIÓN DE LOS VARIADORES.	63
		10

16	COMO SERA EL MONITOREO DEL EQUIPO.	63
17	CALIDAD DE SERVICIO ELECTRICO DE LA RED DEMANDADO PARA OPERACIÓN DEL VARIADOR	65
17.1	LA RED. ....	65
18	EL ARRANQUE	65
19	DETALLES DE LA INSTALACION DE VARIADORES DE VARIADORES.	66
19.1	ARMONICOS. ....	67
19.2	ASPECTOS NORMATIVOS EN CUANTO AL CONTENIDO ARMONICO....	68
19.3	REACTANCIA DE RED/INDUCTOR DE LINK DC. ....	69
19.4	ARMONICAS QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCION. ....	71
19.5	PERDIDAS GENERADAS POR EFECTO DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DEL VARIADOR DE VELOCIDAD. ....	73
20	CONSIDERACIONES SOBRE LA EFICIENCIA DEL BLOQUE MOTOR Y CONVERTIDOR.	75
21	EVALUACIÓN NORMATIVA EN CUANTO A LA EFICIENCIA DE MOTORES ALIMENTADOS POR VARIADORES.	76
22	INFLUENCIA DEL VARIADOR DE VELOCIDAD EN LA TEMPERATURA DEL MOTOR.	77
23	CARACTERISTICAS DE DISEÑO PARA MOTORES OPERADOS POR VARIADORES DE VELOCIDAD	78
23.1	MOTOR, CONSIDERACIONES ELÉCTRICAS. ....	78
23.1.1	OPERACIONES ESTÁNDAR EN 60 HZ (50 HZ) ....	78
23.1.2	EL ROTOR. ....	78
23.1.3	ESTATORES. ....	79
23.1.4	SELECCIÓN DEL NUMERO DE POLOS. ....	80
23.1.5	VENTILACION Y RUIDO. ....	81
23.2	CONSIDERACIONES MECANICAS. ....	82
23.2.1	DINAMICA LATERAL. ....	82
23.2.2	CONSTRUCCION DEL ROTOR. ....	82
24	MOTORES ESPECIALES CLASIFICADOS COMO 'INVERTER DUTY' ALIMENTADOS POR VARIADORES DE VELOCIDAD	83

24.1	EFFECTOS DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN .....	83
24.2	DISEÑOS DE MOTOR 'INVERTER DUTY' .....	84
24.3	DIRECTRICES PARA LA SELECCIÓN DE MOTOR .....	86
24.4	ACCIONES SUGERIDAS.....	86
25	ESQUEMAS DE CONEXIÓN PARA SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE.	87
25.1	ESQUEMA UNIFILAR.....	87
25.2	ESQUEMA CONEXIÓN DEL VARIADOR.....	88
25.3	DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA A 115V. ....	89
25.4	DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA A 480V .....	90
25.5	SALIDA DEL VARIADOR A 480VAC.....	91
26	ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS IMPLEMENTADOS EN ESTACIONES DE BOMBEO DE AGUA POTABLE.	92
26.1	PANTALLA DE SUPERVISON VW341103.....	93
<b>CAPITULO 3.</b>		95
1	MARCO NORMATIVO	95
2	DETERMINACION DE LA EFICIENCIA SEGÚN EL IEEE STD. 739	95
2.1	ENCUESTAS DE MOTOR .....	95
2.2	MÉTODO DE MEDICIÓN.....	100
2.3	CORRECCIONES AL DESLIZAMIENTO PLENA CARGA DEBIDO A CAMBIOS EN EL VOLTAJE Y TEMPERATURA AMBIENTE. ....	101
2.4	PROCESO DE MEDICIÓN .....	101
3	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA SEGÚN EL STD IEEE 112	102
3.1	TIPOS DE PÉRDIDAS.....	102
3.2	MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA.....	102
3.3	SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA. ....	103
3.4	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ACUERDO AL MÉTODO B.....	103
4	APLICANDO EL METODO DE STD. IEEE 739.	105
4.1	LLENADO DE FORMULARIO, PROPUESTO POR STD. IEEE 739.....	106

5	CÁLCULO ESTIMADO, FÁCTURA MENSUAL A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS.	107
6	MEDICIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS.	109
6.1	REGISTRO OBTENIDO DE MONITOREO DE CAUDAL Y PRESION CADA HORA, DURANTE SIETE DIAS.	110
6.2	PROMEDIO DE PRESIONES Y CAUDALES DURANTE EL PERIODO DE MEDICION.	111
6.3	GRAFICAS PROMEDIO.	112
6.4	GRAFICAS CAUDAL Y PRESION.	113
6.5	PRODUCCION ACTUAL VS. PRODUCCION ESPERADA.	113
6.6	CURVA NOMINAL DE BOMBA HIDRAULICA PARA EXTRACCION DE AGUA POTABLE ENCONTRADA EN PLANTEL LA SULTANA Y AVANICO DE DEMANDA ENCONTRADO.	114
7	MEDICION DE PARAMETROS ELECTRICOS.	115
7.1	MEDICIONES EN EL BANCO DE TRANSFORMADORES.	115
7.1.1	GRAFICAS DE TENSIONES DEL BANCO DE TRANSFORMADORES.	116
7.1.2	GRAFICAS DE CORRIENTES DEL BANCO DE TRANSFORMADORES.	117
7.1.3	GRAFICAS DE ENERGIA DE BANCO DE TRANSFORMADORES.	119
7.2	MEDICIONES A LA SALIDA DEL VARIADOR.	120
7.2.1	GRAFICAS DE ENERGIA (kWh) DEL VARIADOR.	122
7.2.2	GRAFICAS DE ENERGIA (VARH) DEL VARIADOR.	122
7.2.3	GRAFICAS DE ENERGIA (kWh) POR FASE DEL VARIADOR.	123
7.2.4	GRAFICAS DE POTENCIA ACTIVA PROMEDIO VARIADOR.	123
7.2.5	GRAFICAS DE POTENCIA APARENTE PROMEDIO VARIADOR.	124
7.2.6	GRAFICAS DE FRECUENCIA DE VOLTAJE PROMEDIO DEL INVERSOR.	124
	<b>CAPITULO 4.</b>	125
1	ANALISIS Y SELECCIÓN DE EQUIPO.	125
1.1	CONDICIONES ACTUALES, OBSERVACIONES:	125
2	PROPUESTA DE SELECCIÓN DE LA NUEVA BOMBA.	126
3	CALCULO DE HP DE MOTOR A PARTIR DE BHP.	128
4	PROPUESTAS DE MOTOR VS. MOTOR ACTUAL	130

5	CÁLCULO DE POTENCIA.	130
5.1	CONDICIONES DE DISEÑO, BOMBA M10LC. ....	131
5.2	CONDICIONES REALES, BOMBA M10LC. ....	131
5.3	CONDICIONES PROPUESTAS, BOMBA L10HC. ....	131
5.3.1	RESUMEN DE CADA UNA DE LAS CONDICIONES CALCULADAS. ....	132
6	NUEVA EFICIENCIA PARA EL MOTOR ACTUAL A PARTIR DEL FACTOR REBOBINADO.	133
7	CALCULOS DE COSTOS DE OPERACIÓN ANUAL.	134
8	CALCULO DE AHORRO.	136
9	EFICIENCIA DEL SISTEMA.	137
9.1	PRIMER CASO. ....	137
9.2	SEGUNDO CASO. ....	137
9.3	TERCER CASO. ....	138
9.4	CUARTO CASO. ....	138
10	DESPLAZAMIENTO PARA EL INCREMENTO DE 1% DE EFICIENCIA.	138
	CONCLUSIONES.	140
	RECOMENDACIONES.	142
	GLOSARIO.	143
	BIBLIOGRAFIA.	146
	ANEXOS.	148
	Formulario propuesto por sección 6.17 “Realizando una encuesta de motor” Std. IEEE 739. ....	148

## INDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Circuito equivalente aproximado del motor.	24
Figura 2 Circuitos utilizados en el equivalente thevenin.	25
Figura 3 Curva par-velocidad obtenida con la ecuación del par inducido.	27
Figura 4 Curvas par-velocidad para los diseños de los motores de inducción.	27
Figura 5 Motor de inducción sencillo de dos polos adecuado para un cambio de polos.	31
Figura 6 Vista en detalle de una fase de un devanado de polos cambiantes.	31
Figura 7 Conexiones posibles de las bobinas del estator en un motor de polos cambiantes	33
Figura 8 Relación par-velocidad para velocidades debajo de la velocidad base.	36
Figura 9 Relación par-velocidad para velocidades arriba de la velocidad base.	37
Figura 10 Control de velocidad de un motor de inducción por variación de la tensión de línea.	38
Figura 11 Control de velocidad mediante variación de la resistencia del rotor de un motor	39
Figura 12 Definiciones de la carga estática total de un sistema	42
Figura 13 Curva de fricción del sistema y curva de carga del sistema.	44
Figura 14 Características del sistema para una carga estática variable.	45
Figura 15 Características del sistema para una carga estática variable.	46
Figura 16 Características de rendimiento de una bomba centrífuga.	47
Figura 17 Valores de diámetros recomendados para impulsores de menor tamaño.	49
Figura 18 Esquema en bloque de un variador de velocidad.	51
Figura 19 Relación lineal entre la tensión y frecuencia entregada a un motor de inducción por	57
Figura 20 Forma de onda de corriente medida la entrada de un variador de velocidad.	67
Figura 21 Formas de onda de corriente.	69
Figura 22 Formas de onda de tensión.	70
Figura 23 Forma de tensión de salida de variador de velocidad.	71
Figura 24 Forma de corriente de salida de variador de velocidad.	72
Figura 25 Forma de tensión de salida de variador de velocidad.	73
Figura 26 Aumento de pérdidas alimentado por generación PWM.	74
Figura 27 Reducción porcentual HVF.	75
Figura 28 Interior de gabinete de variador de velocidad Schneider	93
Figura 29 Terminal gráfico de variador de velocidad Schneider Altivar 61.	93
Figura 30 Motor eléctrico vertical de eje hueco General Electric, 150Hp en funcionamiento en estación de bombeo La Sultana.	94
Figura 31 Curva típica motor de inducción diseño B, NEMA.	99
Figura 32 Gráfica de datos promedio de presión-hora	112
Figura 33 Gráfica de datos promedio de caudal-hora.	112
Figura 34 Gráfica en conjunto de datos promedio de caudal-hora presión-hora.	113
Figura 35 Gráfica de datos promedio de caudal-hora comparada con lo esperado por la bomba.	113
Figura 36 Curva nominal de bomba m10lc, rango de caudal de entrega encontrado.	114
Figura 37 Gráficas de tensión aguas arriba de interruptor principal.	116

Figura 38 Graficas de corrientes, tomadas aguas arriba de interruptor principal.	117
Figura 39 Graficas de la distorsión armónica de la corriente del interruptor principal.	117
Figura 40 Potencia promedio registrada en periodo de medicion.	118
Figura 41 Graficas de energía, tomadas aguas arriba de interruptor.	119
Figura 42 Graficas de energía, tomadas aguas arriba de interruptor.	119
Figura 43 Forma de onda de la tensión a la salida del variador	120
Figura 44 Forma de onda de la corriente a la salida del variador.	121
Figura 45 Graficas de la distorsión armónica de voltaje a la salida del variador.	121
Figura 46 Graficas de energía kWh a la salida del variador.	122
Figura 47 Graficas de energía VARH tomadas a la salida del variador	122
Figura 48 Energía en kWh por fases y total, durante el periodo de medición.	123
Figura 49 Potencia activa promedio, máxima y mínima durante el periodo de medición.	123
Figura 50 Potencia aparente promedio, máxima y mínima durante el periodo de medición.	124
Figura 51 Registro de frecuencia de voltaje de salida del inversor, mínimo, máximo y	124
Figura 52 Marcado de los caudales mínimos y máximos para el cálculo del número de etapas.	127
Figura 53 Reducción de la eficiencia por cada rebobinado en el motor. Fuente:	133
Figura 54 Formulario para "Encuestas de Motor" de Std. IEEE 739 Seccion 6.16 y 6.17.	148
Figura 55 Hoja de datos de variador de velocidad Schneider Altivar 61.	149
Figura 56 Hoja de datos de bomba M10LC de National Pump	149
Figura 57 Datos de placa de motor electrico.	149
Figura 58 Hoja de datos de la nueva propuesta de bomba en plantel LA SULTANA.	149

## INDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Tipos de carga y aplicaciones.	59
Tabla 2 Maxima distorsion armonica recomendada.	68
Tabla 3 Maxima distorsion armonica de corriente.	68
Tabla 4 Soluciones para reducci3n de arm3nicas.	72
Tabla 5 Perdidas en motores de inducci3n.	74
Tabla 6 Equipo actual en estaci3n de bombeo La Sultana.	92
Tabla 7 Formulario propuesto por el std. 739, campos doble subrayado datos obligatorios	106
Tabla 8 Formulario propuesto por el std. 739, campos doble subrayado datos obligatorios	107
Tabla 9 Precios de energia y costos fijos de pliego tarifario vigente, distribuidora	107
Tabla 10 Consumos registrados durante periodo de medicion.	108
Tabla 11 Estimacion de factura mensual, sin IVA.	108
Tabla 12 Factor de potencia requerido, encontrado y diferencia.	108
Tabla 13 C3lculo de recargo por bajo factor de potencia [7].	109
Tabla 14 Nueva estimacion mensual con recargo por bajo factor de potencia, sin IVA.	109
Tabla 15 Diferencias en factura mensual estimada.	109
Tabla 16 Datos hidr3ulicos de presi3n y caudal instant3neo.	110
Tabla 17 Datos hidr3ulicos promedio de presi3n y caudal instant3neo.	111
Tabla 18 Datos t3cnicos actuales de la bomba instalada en el plantel LA SULTANA.	126
Tabla 19 Par3metros de motor el3ctrico que actualmente opera y tres motores propuestos.	130
Tabla 20 Resumen de las distintas condiciones analizadas para la estaci3n de bombeo	132
Tabla 21 C3lculo de nueva eficiencia estimada a partir de factor rebobnado.	133
Tabla 22 Estimaci3n de horas de trabajo por franja horaria, d3a, mes y a3o.	134
Tabla 23 Precios de energ3a y costos fijos de pliego tarifario vigente, distribuidora	134
Tabla 24 Costos de operacion motor actual	135
Tabla 25 Costos de operaci3n estimados para el motor propuesto.	135
Tabla 26 Ahorro estimado a partir del consumo de motor actual y motor propuesto.	136
Tabla 27 Estimacion de tiempo de recuperacion con reemplazo de motor electrico al propuesto.	137
Tabla 28 Eficiencia del sistema esperada, primer caso.	137
Tabla 29 Eficiencia del sistema esperada, segundo caso.	137
Tabla 30 Eficiencia del sistema esperada, tercer caso.	138
Tabla 31 Eficiencia del sistema esperada, cuarto caso.	138

## INTRODUCCION.

Es indispensable iniciar un trabajo orientado a identificar procedimientos de ensayo que permitan la determinación real de la eficiencia de motores eléctricos cumpliendo con las condiciones que exigen las normas internacionales, teniendo en cuenta que su implementación y utilización sean tecnológicamente posibles.

En relación al tema de los motores de alta eficiencia es importante mencionar algunos aspectos como los costos de la energía eléctrica, específicamente para los grandes clientes es un motivo de permanente atención, ya que les representa ahorros ó incrementos en su factura. En las instalaciones eléctricas de estos grandes clientes los equipos que consumen mayor cantidad de energía son los motores eléctricos; por tanto cualquier esfuerzo para minimizar su consumo constituye una manera de reducción de costos.

Los sistemas de bombeo accionados por variadores de velocidad son una de las aplicaciones bajo las cuales se desea evaluar las consideraciones propuestas por el Std. IEEE 739, ya que como se mostrara, los sistemas que incluyen motores accionados por variadores de velocidad operan a frecuencias por debajo o por arriba de la frecuencia industrial de 60 Hz. Se desea evaluar las mejoras del rendimiento del sistema en conjunto ya que así se podrá observar la mejora en aspectos importantes, desde la perspectiva técnica, así como de la economía en cuanto al pago de facturas por consumo eléctrico.

## OBJETIVO GENERAL.

- ❖ Determinar el parámetro rendimiento en el sitio de trabajo de motores eléctricos trifásicos de inducción operados por variadores de velocidad, en estación de bombeo de agua potable, utilizando el método planteado en el Std. IEEE 739.

## OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- ❖ Determinar el parámetro rendimiento en el sitio de trabajo del motor eléctrico operado por variador de velocidad, en la estación de bombeo de agua potable “La Sultana” propiedad de ANDA.
- ❖ Realizar medición en el sitio de trabajo, considerando la variación de parámetros que afecta el valor del parámetro de rendimiento, corrección por temperatura y tensión.
- ❖ Analizar el comportamiento actual de la estación de bombeo, estudiando el conjunto motor-bomba y determinar su eficiencia.
- ❖ Estimar los costos de operación, ahorro anual y facturación mensual con el equipo actual.

# CAPITULO 1.

## TEORÍA SOBRE EL MOTOR DE INDUCCIÓN, PAR INDUCIDO, MÉTODOS PARA CONTROLAR LA VELOCIDAD Y TEORÍA DE BOMBAS CENTRIFUGAS.

---

### 1 CONCEPTOS BÁSICOS ACERCA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

La operación de los motores de inducción se asemeja a la operación de los devanados de amortización de los motores síncronos. A continuación repasaremos conceptos básicos sobre la operación y se definirán términos importantes para poder entender la operación de los motores de inducción.

#### 1.1 DESARROLLO DEL PAR INDUCIDO.

En los motores de inducción tipo jaula de ardilla se aplican tensiones y corrientes trifásicas al estator lo que produce un campo magnético  $B_s$  que rota en dirección opuesta a las manecillas del reloj. La velocidad de rotación del campo magnético está dada por la siguiente por:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad (1)$$

Donde  $f_e$  es la frecuencia de la fuente de alimentación en Hertz y  $P$  es el número de polos del motor. El campo rotacional magnético  $B_s$  pasa por las barras del rotor induce voltaje en ellas. La expresión que define la tensión inducida en una barra del rotor del motor es la siguiente:

$$e = (V \times B) \cdot L \quad (2)$$

Dónde:

$V$ = velocidad de la barra, relativa al campo magnético.

$B$ = vector de densidad de flujo magnético.

$L$ = longitud del conductor en el campo magnético.

El movimiento relativo del rotor con respecto al campo magnético del estator produce tensión inducida en una barra del rotor. La velocidad de las barras de la parte superior del rotor con relación del campo magnético tiende hacia la derecha de modo que el voltaje inducido en las barras superiores tiende hacia fuera de esta página y la tensión inducida en la parte inferior de las barras tiende hacia adentro de esta página.

Esto origina un flujo de corriente hacia fuera en las barras superiores y hacia dentro en las inferiores. Y ya que el rotor es inductivo la corriente pico del rotor queda en atraso con relación al voltaje pico del rotor. El flujo de corriente del rotor produce el campo magnético del rotor  $B_R$  y finalmente el par inducido en el motor está dado por

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_S \quad (3)$$

La dirección del par resultante va en sentido contrario a las manecillas del reloj. Puesto que la dirección del par inducido en el rotor va en sentido contrario a las manecillas del reloj el rotor acelera en esa dirección.

En operación normal los campos magnéticos  $B_R$  y  $B_S$  que corresponden al rotor y el estator rotan conjuntamente a la velocidad síncrona  $n_{sinc}$  mientras que el rotor en si gira a una velocidad menor.

## 1.2 CONCEPTO DE DESLIZAMIENTO.

El comportamiento de un motor de inducción depende tanto de la tensión y corriente del rotor con mucha frecuencia es más común hablar de su velocidad relativa. Hay dos términos para definir el movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento definida como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (4)$$

Dónde:

$n_{des}$ = velocidad de deslizamiento del motor

$n_{sinc}$ = velocidad del campo magnético

$n_m$ = velocidad mecánica del eje del motor

El otro termino que se utiliza para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, el cual representa la velocidad relativa expresada sobre una base porcentual o en por unidad. La siguiente expresión define el deslizamiento:

$$s = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} (\times 100\%) = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100\%) \quad (5)$$

También pueden expresarse las relaciones anteriores en términos de velocidad angular:

$$s = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} (\times 100\%) \quad (6)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (7)$$

Estas ecuaciones son útiles para la deducción del par del motor y en las relaciones de potencia.

### 1.3 FRECUENCIAS ELÉCTRICAS EN EL ROTOR.

Se puede aplicar el mismo principio de operación y análisis a un motor de inducción con el de un transformador con la diferencia que el secundario de nuestro motor es el rotor y por eso se le llama transformador rotante. Ahora la diferencia marcada entre estas dos máquinas es que en el transformador la misma frecuencia de operación es la del primario y secundario y en los motores de inducción la frecuencia del estator es diferente que la del rotor.

Si el rotor de un motor está bloqueado de modo que no se puede mover el rotor tendrá la misma frecuencia de operación que la del estator. Si el rotor gira a la velocidad síncrona la frecuencia en el rotor será de cero. Para cualquier velocidad intermedia la frecuencia del rotor es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético  $n_{sinc}$  y la velocidad del rotor  $n_m$  y ya que el deslizamiento se define como ya lo vimos la frecuencia en el rotor está dado por:

$$f_r = sf_e = \frac{P}{120} (n_{sinc} - n_m) \quad (8)$$

#### 1.4 ECUACIÓN DEL PAR INDUCIDO EN MOTORES DE INDUCCIÓN.

Para la deducción del par inducido de los motores de inducción nos vamos a auxiliar del circuito equivalente del mismo así como del diagrama de flujo de potencia para llegar a una expresión general acerca del par inducido. Dicha expresión estará en función de dos parámetros de interés: la tensión aplicada a los devanados del estator y la frecuencia de la fuente de alimentación. Estos dos parámetros son los que pueden ser controlados por los variadores de velocidad que estamos estudiando.

En los motores de inducción el par inducido puede estar en función de las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \quad (9)$$

En estas dos ecuaciones podemos ver que el par inducido puede ser encontrado si conocemos tanto la potencia de conversión, la potencia en el entrehierro, así como la velocidad del motor y la velocidad síncrona. La ecuación que está en función de la potencia en el entrehierro es muy útil ya que la velocidad síncrona es constante por estar en función de la frecuencia de la fuente de alimentación y del número de polos de la máquina.

La potencia en el entrehierro es aquella que se cruza el espacio desde el circuito del estator hasta el circuito del rotor y además dicha potencia es consumida por la resistencia  $R_2/s$  que modela la carga del rotor en la máquina. La potencia en el entrehierro por fase puede ser escrita de la siguiente manera auxiliándonos del circuito equivalente mostrado en la figura 1:

$$P_{AG,1\phi} = \frac{I_2^2 R_2}{s} \quad (10)$$

Y la potencia en el entrehierro total sería de la siguiente manera:

$$P_{AG} = \frac{3I_2^2 R_2}{s} \quad (11)$$

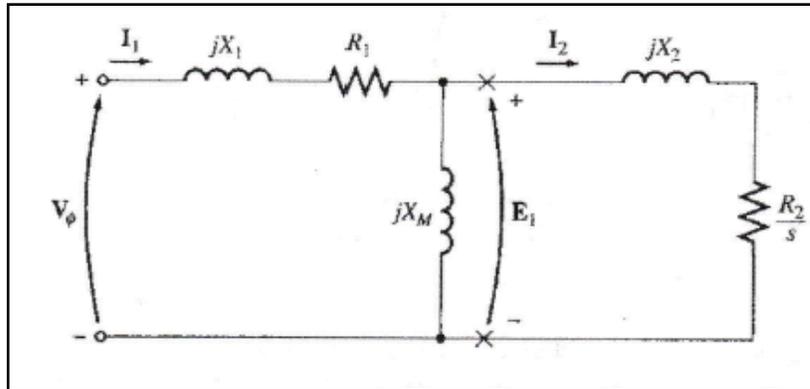


Figura 1 Circuito equivalente aproximado del motor.

Aquí la determinación de la corriente  $I_2$  nos permite determinar la potencia en el entrehierro y por ende el par inducido. Del circuito equivalente del motor podemos encontrar la ecuación de la corriente  $I_2$  mediante técnicas de análisis de circuitos eléctricos. Nos vamos a auxiliar del teorema de thevenin el cual nos dice que podemos aislar cierta parte de un circuito y encontrar un equivalente eléctrico que consta de una fuente de alimentación en serie con una impedancia ambos equivalentes. En el circuito equivalente del motor de inducción abriremos en los puntos mostrados con equis hacia la izquierda encontraremos el equivalente thevenin.

El voltaje thevenin se encuentra utilizando un divisor de tensión:

$$V_{th} = V_{\phi} \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} \quad (12)$$

$$V_{th} = V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_1 + jX_M} \quad (13)$$

Y la magnitud de dicha tensión es la siguiente:

$$V_{th} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (14)$$

Si la reactancia de magnetización  $X_M \gg X_1$ , y  $X_M \gg R_1$  la magnitud del voltaje thevenin puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$V_{th} \cong V_{\phi} \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (15)$$

El teorema de Thevenin nos dice que para encontrar la impedancia equivalente de un circuito es necesario cortocircuitar la fuente de alimentación y resolver para la impedancia.

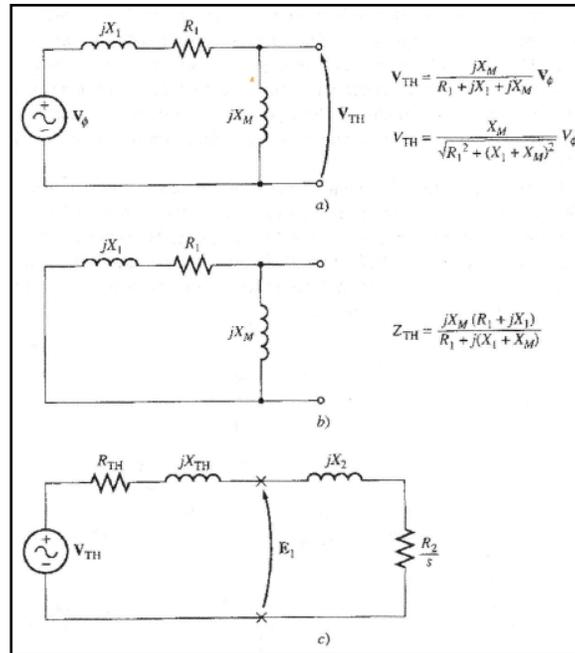


Figura 2 Circuitos utilizados en el equivalente thevenin.

El circuito equivalente del motor nos muestra que la impedancia del estator y la reactancia de magnetización están en paralelo y por tanto podemos hacer lo siguiente:

$$Z_{th} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (16)$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (17)$$

Ya que  $X_M \gg X_1$  y  $X_M + X_1 \gg R_1$  impedancia thevenin de nuestro circuito seria la siguiente:

$$R_{th} \cong R_1 \left( \frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 \quad (18)$$

$$X_{th} \cong X_1 \quad (19)$$

Ahora tomamos el circuito equivalente y sustituimos el voltaje y la impedancia de thevenin y resolveremos para encontrar la corriente  $I_2$ . Haciendo un LVK en nuestro circuito podemos encontrar la siguiente expresión:

$$-V_{th} + I_2 R_{th} + jI_2 X_{th} + jI_2 X_2 + \frac{I_2 R_2}{s} = 0 \quad (20)$$

$$I_2 = \frac{V_{th}}{R_{th} + \frac{R_2}{s} + jX_{th} + jX_2} \quad (21)$$

La magnitud de esta corriente es la siguiente

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (22)$$

Ahora como la potencia en el entrehierro está dada por

$$P_{AG} = \frac{3I_2^2 R_2}{s} \quad (23)$$

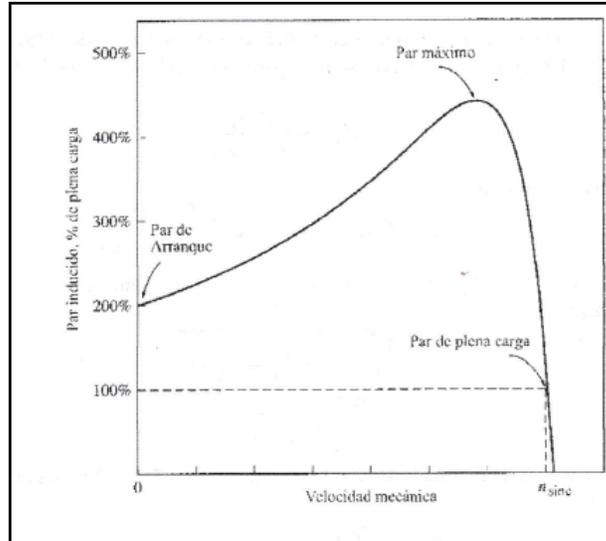
$$P_{AG} = \frac{3V_{th}^2 R_2 / s}{(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (24)$$

Y como el par inducido al rotor está dado por

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \quad (25)$$

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{th}^2 R_2 / s}{\omega_{sinc} [(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2]} \quad (26)$$

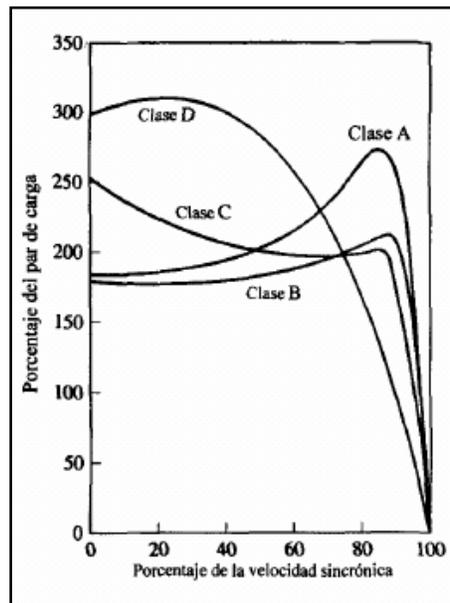
Como podemos observar el par inducido está en función de dos parámetros que nos interesan a la hora de realizar en control de velocidad la tensión de thevenin que representa la tensión de suministro del motor de inducción y la velocidad síncrona que depende de la frecuencia de la tensión de alimentación. En la figura 3 se muestra la característica típica de la curva par-velocidad de un motor de inducción de acuerdo a la ecuación del par inducido.



*Figura 3 Curva par-velocidad obtenida con la ecuación del par inducido.*

### 1.5 CLASES DE DISEÑO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.

La National Electric Manufacturers Association (NEMA) y la International Electrotechnical Comision (IEC), han desarrollado un sistema de identificación mediante letras para los motores comerciales, según las curvas características par-velocidad para cada diseño. A continuación las mencionaremos de una manera breve y sencilla.



*Figura 4 Curvas par-velocidad para los diseños de los motores de inducción.*

### 1.5.1 DISEÑO CLASE A.

Es un motor de jaula de ardilla para usarse a velocidad constante. Sus principales Características son:

- ❖ Buena capacidad de disipación de calor.
- ❖ Alta resistencia y baja reactancia al arranque.
- ❖ El par máximo está entre 200% y 300% del par de plena carga
- ❖ y ocurre a un bajo deslizamiento.
- ❖ Aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal.
- ❖ Presenta la mejor regulación de velocidad, entre el 2 y 4%.
- ❖ Desafortunadamente su corriente de arranque varía entre 5 y 7
- ❖ veces la corriente nominal.
- ❖ Han sido reemplazados por los motores de diseño clase B en
- ❖ los últimos años.
- ❖ Se utilizan en ventiladores, sopladores, bombas, tornos, etc.

### 1.5.2 DISEÑO CLASE B.

Se les llama motores de propósito general y a este tipo pertenecen la mayoría de los motores con rotor de jaula de ardilla. A continuación se resumen sus características:

- ❖ Par de arranque normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento.
- ❖ Produce casi el mismo par de arranque que el diseño anterior.
- ❖ El par máximo es mayor o igual al 200% el par de carga nominal.
- ❖ Deslizamiento bajo (menor del 5%).
- ❖ Se prefieren sobre los diseños de clase A por requerir poca corriente de arranque.

### 1.5.3 DISEÑO CLASE C.

- ❖ Alto par de arranque (entre 2 y 2.5 veces el nominal) con bajas corrientes de arranque (de 3.5 a 5 veces la nominal).
- ❖ Son construidos con un rotor de doble jaula (más costosos).
- ❖ Bajo deslizamiento (menos del 5%) a plena carga.
- ❖ Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente.
- ❖ Cuando se emplea con cargas pesadas, se limita la disipación Térmica del motor, ya que la mayor parte de la corriente se Concentra en el devanado superior.
- ❖ Tiende a sobrecalentarse con arranques frecuentes.
- ❖ Se utilizan para cargas con alto par de arranque, Compresor y transportador.

#### 1.5.4 DISEÑO CLASE D.

- ❖ También conocidos como de alto par y alta resistencia.
- ❖ Alto par de arranque (275% o más del nominal) y baja corriente de arranque.
- ❖ Alto deslizamiento a plena carga.
- ❖ La alta resistencia del rotor desplaza el par máximo hacia una velocidad muy baja.
- ❖ Diseñado para servicio pesado de arranque, en especial grandes volantes utilizados en troqueladoras o cortadoras.
- ❖ También existen las clases E y F, llamados motores de inducción de arranque suave, pero obsoletos hoy en día.

## 2 CONTROL DE VELOCIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN.

La llegada de los controladores de estado sólido ha cambiado de una manera considerable el control de velocidad en los motores de inducción. Antes de eso los motores y en especial los de inducción no eran los más adecuados para el uso en aplicaciones donde se necesitara un considerable control de su velocidad.

El rango normal de operación de un motor típico de inducción (clase A, B, C) está confinado a un 5% de deslizamiento y el cambio de velocidad en ese rango es más o menos directamente proporcional a la carga en el eje del motor. Aun y cuando el deslizamiento fuera mayor, la eficiencia del motor sería muy pobre debido a las pérdidas del rotor que dicho sea de paso son directamente proporcionales al deslizamiento del motor ( $P_{RCL}=sP_{AG}$ ).

Existen dos técnicas para el control de la velocidad en motores de inducción, una de ellas consiste en variar la velocidad síncrona de la máquina (la velocidad de los campos magnéticos del estator y rotor) ya que la velocidad del rotor siempre será cercana a la  $n_{sinc}$ . La otra técnica consiste en variar el deslizamiento de acuerdo a una carga dada. Todo esto se deriva de la ecuación de la velocidad síncrona:

$$n_{sinc} = \frac{120f}{p} \quad (27)$$

De esta ecuación podemos observar que hay dos parámetros de control sobre el cual podemos ejercer cierto control:

- 1) Cambiando la frecuencia eléctrica de la fuente de alimentación de la máquina.
- 2) Cambiando el número de polos de la máquina.

El control del deslizamiento se puede realizar variando la resistencia del rotor o variando la tensión de alimentación del motor.

## 2.1 CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR MEDIANTE EL CAMBIO DE POLOS.

Hay dos métodos importantes para poder variar el número de polos en un motor de inducción:

- ❖ El método de polos consecuentes.
- ❖ Devanados de estator múltiples.

El método de polos subsecuentes es uno de los más viejos. Dicho método se basa en el hecho de que el número de polos en el estator se puede cambiar con facilidad en una relación de 2:1 efectuando cambios en las conexiones de sus bobinas.

La figura 5 muestra el estator de un motor de inducción sencillo de dos polos adecuado para un cambio de polos. Podemos observar que las bobinas individuales son de muy corto paso ( $60^\circ$  a  $90^\circ$ ). La figura 6 muestra la fase a de los devanados por separado para una mayor claridad.

En la figura 6a se muestra el flujo de corriente en la fase a de los devanados del estator en cierto instante de tiempo en operación normal. Aquí podemos ver que el campo magnético (o densidad de flujo magnético) sale del estator en el grupo de fase superior formando un polo norte y entra al estator en el grupo de la fase inferior formando un polo sur. Este devanado está produciendo dos polos magnéticos en el estator.

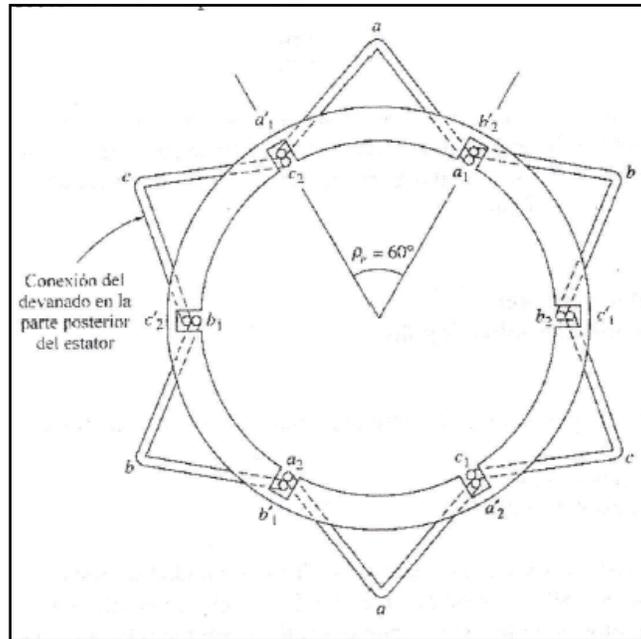


Figura 5 Motor de inducción sencillo de dos polos adecuado para un cambio de polos.

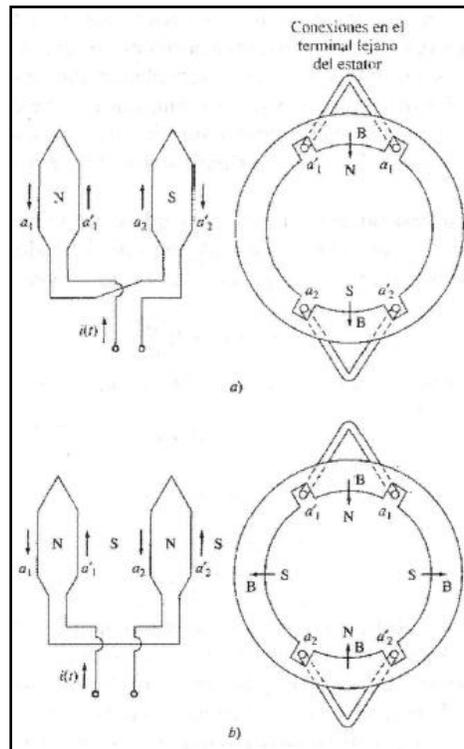
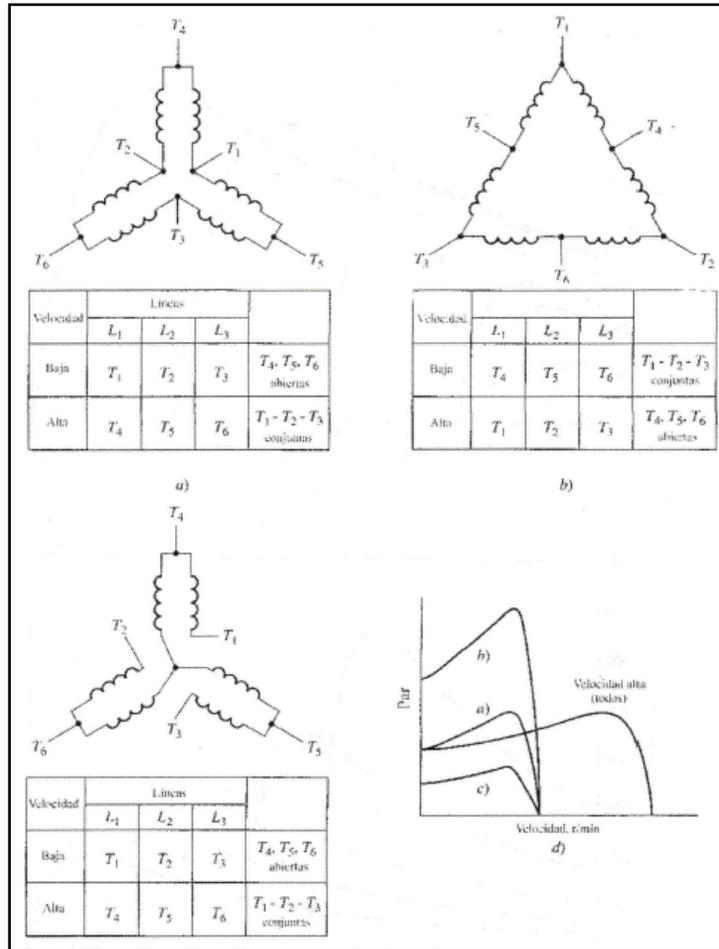


Figura 6 Vista en detalle de una fase de un devanado de polos cambiantes.

Ahora suponga que invertimos la dirección del flujo de corriente en el grupo de fase inferior como se muestra en la figura 6b entonces el campo magnético sale del estator tanto en el grupo de la fase inferior como en el de la fase superior (cada uno de ellos será un polo norte magnético). El flujo magnético en esta máquina debe de retornar al estator entre los dos grupos de fase produciendo un par de polos sur magnéticos consecuentes. Note que ahora el estator tiene cuatro polos magnéticos, en lugar de dos como es el caso anterior.

El rotor de la maquina analizada es del tipo jaula de ardilla y ya que el rotor de jaula de ardilla consta de la misma cantidad de polos inducidos que con los que cuenta el estator se puede adaptar a dichos cambios. Cuando el motor de dos polos es reconectado para que pueda operar con cuatro polos el par máximo puede llegar a ser igual al de antes (conexión de par constante), la mitad de su valor anterior (conexión de par que sigue la ley de los cuadrados) o dos veces su valor previo (conexión de salida de potencia constante) dependiendo de cómo se reconecten los devanados del estator. La figura 7 muestra los tipos de conexiones posibles en el estator y sus efectos en la curva par-velocidad.

Una de las mayores desventajas de este método es que las velocidades deben de estar en relación de 2:1. Para poder superar este tipo de limitantes se emplearon estatores de devanado múltiples con distintos números de polos de los cuales solo se energizaba uno en cada oportunidad.



**Figura 7** Conexiones posibles de las bobinas del estator en un motor de polos cambiantes junto con las características resultantes par-velocidad.

## 2.2 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO DE FRECUENCIA DE LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN.

Entre las técnicas de control de velocidad para motores de inducción se encuentra el cambio en la frecuencia de la fuente de alimentación. Esta técnica ha tomado mayor fuerza por el desarrollo de la electrónica de potencia como tal. Esta técnica consiste en que si se cambia la frecuencia eléctrica aplicada al estator de un motor de inducción la velocidad de rotación de los campos magnéticos  $n_{sinc}$  cambiara en proporción directa a dicho cambio de frecuencia y con ello el punto de vacío de la curva par-velocidad cambiara.

Definiremos lo siguiente la velocidad  $n_{sinc}$  de nuestro motor la llamaremos como velocidad base. Cuando utilizamos el control de velocidad por frecuencia podemos realizar los ajustes de velocidad al motor ya sea arriba o por debajo de la velocidad

base y junto con ello podemos seleccionar un controlador de velocidad muy flexible que pueda ajustar la velocidad hasta un valor tan bajo de 5% de la velocidad base hasta el doble de dicha velocidad. Ahora hay ciertas consideraciones a la hora de poder realizar este tipo de control y que tienen que ver con la operación confiable de los motores de inducción.

Cuando se opera el motor de inducción a velocidades por debajo de la velocidad base es necesario también reducir la tensión en la misma proporción que la frecuencia para obtener una operación adecuada. La relación de la tensión con la frecuencia para un motor de inducción deberá ser lineal. A este proceso se le conoce como redefinición o derating. Si este proceso no se lleva a cabo saturaremos el acero del núcleo del motor y como consecuencia fluirán corrientes de magnetización excesivas en el núcleo del motor.

Para explicar este fenómeno recordemos que un motor de inducción es un transformador rotante y por tanto podemos auxiliarnos de la ley de Faraday para poder ver el comportamiento del flujo en función de la tensión así como de la frecuencia. La ley de Faraday nos dice lo siguiente:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (28)$$

Si la tensión aplicada la definimos como  $v(t)=V_M \sin(\omega t)$  al núcleo el flujo resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_P} \int v(t) dt \quad (29)$$

$$\phi(t) = \frac{1}{N_P} \int V_M \sin \omega t dt \quad (30)$$

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_P} \cos \omega t \quad (31)$$

En la ecuación del flujo hay dos componentes que nos interesan: la tensión  $V_M$  y la velocidad  $\omega$ . Por ejemplo si la frecuencia eléctrica disminuye en un 10% la tensión también debe de disminuir en la misma proporción. Si la frecuencia disminuye en 10% pero la tensión se mantiene constante el flujo en el núcleo aumentara en la misma proporción que la reducción de la frecuencia y por ende la corriente de magnetización sufrirá el mismo cambio (ósea aumentara).

En la curva de magnetización del motor si observamos la región de no saturación el aumento de la corriente de magnetización será cerca del 10% más sin embargo en la

región saturada de dicha curva un aumento del 10% en el flujo requiere un aumento mucho mayor en la corriente de magnetización.

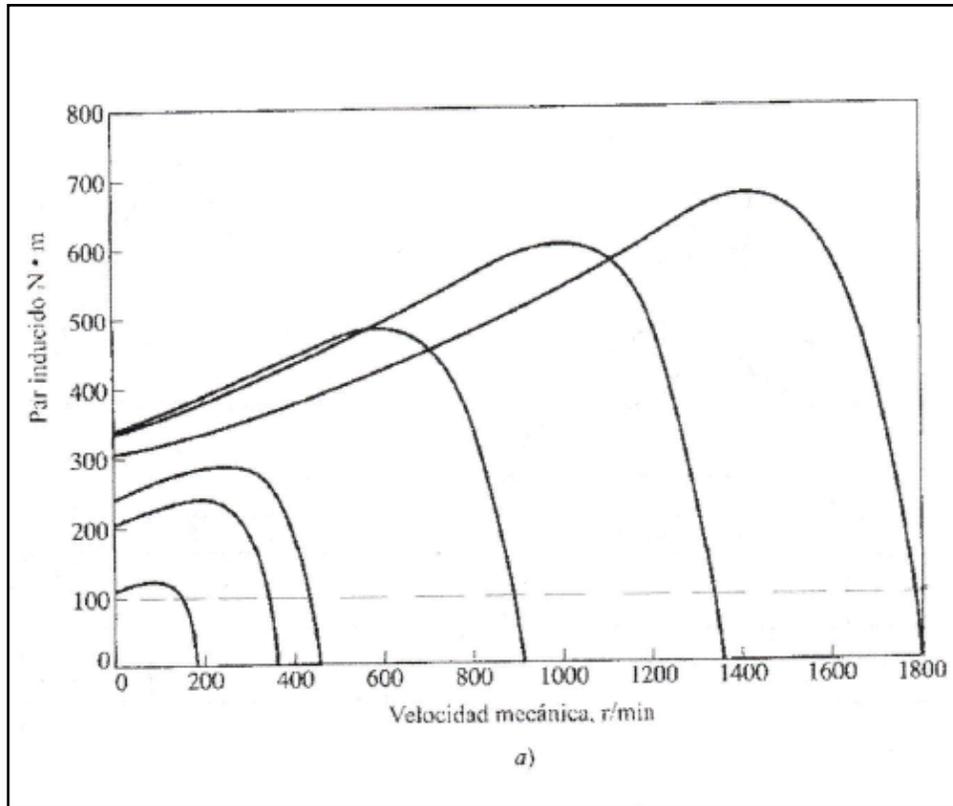
Los motores de inducción son diseñados para operar cerca del punto de saturación de sus curvas pero un aumento en su flujo debido a la disminución de la frecuencia eléctrica causara un flujo excesivo de flujo de corriente de magnetización en el motor.

Por esa razón es necesario reducir en la misma proporción la tensión y la frecuencia ya que como lo muestra la expresión del flujo ambos efectos se contrarrestan y no se ve afectada la corriente de magnetización. Cuando la frecuencia eléctrica y la tensión varían linealmente por debajo de la velocidad base el flujo en el motor permanece aproximadamente constante y con ello el máximo par que pueda suministrar el motor permanece alto.

Ahora bien la potencia que se suministra al motor debe ser disminuida también de una manera lineal junto con la frecuencia y la tensión para evitar sobrecalentar el circuito del estator. La potencia suministrada al motor viene dada por la siguiente expresión:

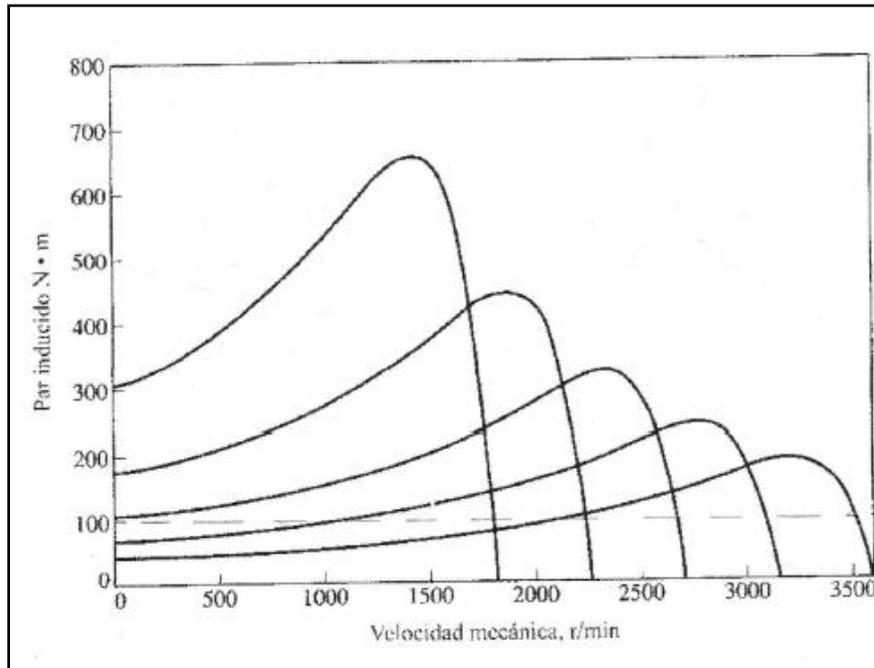
$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \theta \quad (32)$$

Si se disminuye la tensión  $V_L$  la potencia  $P$  también deberá de disminuir o la corriente que fluye en el motor será excesiva y habrá sobrecalentamientos. En la figura 8 se muestra como varía la relación par-velocidad para velocidades menores a la velocidad base suponiendo que la tensión y la frecuencia varían linealmente.



*Figura 8 Relación par-velocidad para velocidades debajo de la velocidad base.*

Si la frecuencia aplicada al motor excede a la frecuencia base, la tensión aplicada al circuito estator se mantendrá constante a la nominal del motor. Las consideraciones acerca de la curva de saturación permitirían elevar la tensión pero se limita por el hecho de que se debe de proteger el aislamiento del devanado del motor. Según la ecuación del flujo si se mantiene la tensión constante y la frecuencia se eleva de la frecuencia base el denominador de la expresión hace que el flujo resultante disminuya y por ende el par sufre el mismo efecto. En la figura 9 se observa el efecto en el motor asumiendo que la tensión se mantiene constante.



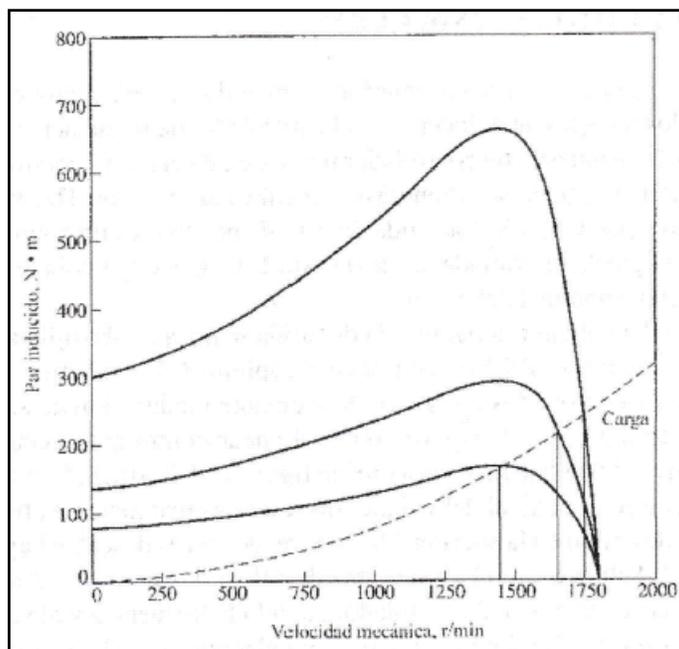
*Figura 9 Relación par-velocidad para velocidades arriba de la velocidad base.*

### 2.3 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE EL CAMBIO EN LA TENSIÓN DE LÍNEA.

Este método se basa en el hecho de que en la ecuación del par de inducción está involucrado el cuadrado de la tensión de alimentación como se muestra a continuación:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{th}^2 R_2 / s}{\omega_{sinc} [(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2]} \quad (33)$$

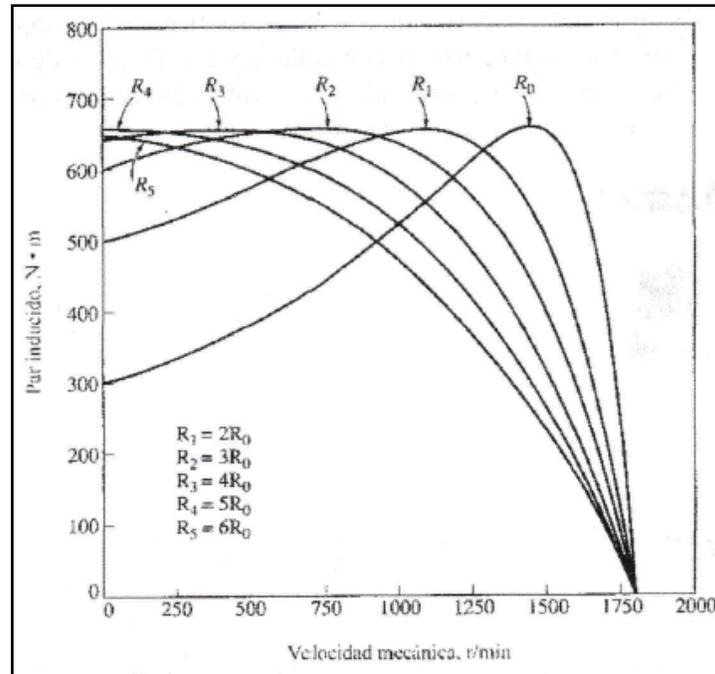
Si una carga tiene una característica par-velocidad como la que se tiene en la figura 10 la velocidad del motor puede ser controlada en un rango muy limitado variando la tensión de alimentación. Este método tiene una mayor aplicación en el manejo y control de motores pequeños utilizados en equipo de ventilación.



*Figura 10 Control de velocidad de un motor de inducción por variación de la tensión de línea.*

#### 2.4 CONTROL DE VELOCIDAD MEDIANTE CAMBIO DE LA RESISTENCIA DEL ROTOR.

Este método solo es aplicable en los motores de inducción de rotor devanado. Insertando resistencia en el rotor del motor es posible cambiar la forma de la curva par-velocidad. Al cambiar la resistencia del rotor se modifica la velocidad de operación del motor, sin embargo este método reduce de manera considerable la eficiencia del motor. Este método solo se utiliza durante periodos cortos debido a los problemas de eficiencia que esto conlleva. La figura 11 muestra los efectos en la curva par-velocidad para distintos valores de resistencia en el rotor.



*Figura 11 Control de velocidad mediante variación de la resistencia del rotor de un motor de inducción de rotor devanado.*

### 3 BOMBAS CENTRIFUGAS.

Las bombas centrífugas también llamadas como bombas roto-dinámicas son las más utilizadas en la actualidad para bombear líquidos de casi cualquier tipo. El 80% de la producción mundial de bombas está constituido por las bombas centrífugas.

Son del tipo bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor. El fluido entra por el centro de un rodete que se compone por unos alabes para conducir el fluido y por la acción de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior donde es recogido por la caja o carcasa de la bomba que por el contorno su forma lo conduce hacia las tuberías de salida o hacia el siguiente rodete.

### 3.1 CARGA Y CURVAS DE CARGA DEL SISTEMAS.

Primero definiremos que entendemos por bombeo. La acción de bombeo se entiende como una adición de energía cinética y potencial a un líquido para moverlo de un lugar a otro, la energía que se le transfiere al fluido hará que efectúe trabajo lo suficientemente necesario para circular por una tubería o subir a una mayor altura.

Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial que se necesiten. Hay tres factores que inciden de una manera directa en la fuerza centrífuga de la bomba:

- ❖ La velocidad en la punta de los alabes o también llamada periferia del impulsor.
- ❖ La densidad del líquido.
- ❖ La cantidad de energía que se aplica por libra de líquido es independiente de la densidad del fluido.

Por tanto en base al último factor antes mencionado podemos afirmar que si una bomba opera a una cierta velocidad y maneja un volumen definido de cierto fluido la energía que se transfiere al fluido es la misma para cualquier líquido sin que importe su densidad. Ahora bien hay una salvedad en cuanto al parámetro viscosidad ya que este si influye de una manera considerable en la energía que se le transfiere al fluido.

Existen tres consideraciones que se deben de tener muy presentes en un sistema de bombeo:

- 1) La carga se puede medir en diversas unidades como ft de líquido, presión en psi, pulgadas de mercurio, etc.
- 2) Las lecturas de presión y de carga pueden ser manométricas o absolutas (la diferencia entre presión manométrica y absoluta varía de acuerdo con la presión atmosférica según sea la altitud).
- 3) Nunca se debe de permitir que la presión en cualquier punto del sistema caiga por debajo de la presión de vapor del líquido.

### 3.2 CARGA DEL SISTEMA.

La bomba solo puede funcionar en un sistema siendo estrictos en la definición. Para poder entregar un cierto volumen requerido por el sistema la bomba debe aplicar al fluido una energía que está compuesta por:

- 1) Carga estática.
- 2) Diferencias de presiones en las superficies de los líquidos.
- 3) Carga de fricción.
- 4) Perdida de entrada y salida.

### 3.3 CARGA ESTÁTICA.

Esta carga significa un cambio de elevación. Por esa razón la carga estática total de un sistema es la diferencia en elevación entre los niveles de líquido en los puntos de descarga y succión de la bomba (figura 12a). La carga estática de descarga es la diferencia en elevación entre el nivel del líquido de descarga y la línea de centros de la bomba (figura 12b). Si la carga estática de succión tiene un valor negativo es porque el nivel del líquido para succión está por debajo de la línea de centros de la bomba, se le suele llamar altura estática de aspiración. Si el nivel del líquido de succión o descarga está sometido a una presión que no sea la atmosférica, esta se puede considerar como parte de la carga estática o como una adición por separado a la carga estática.

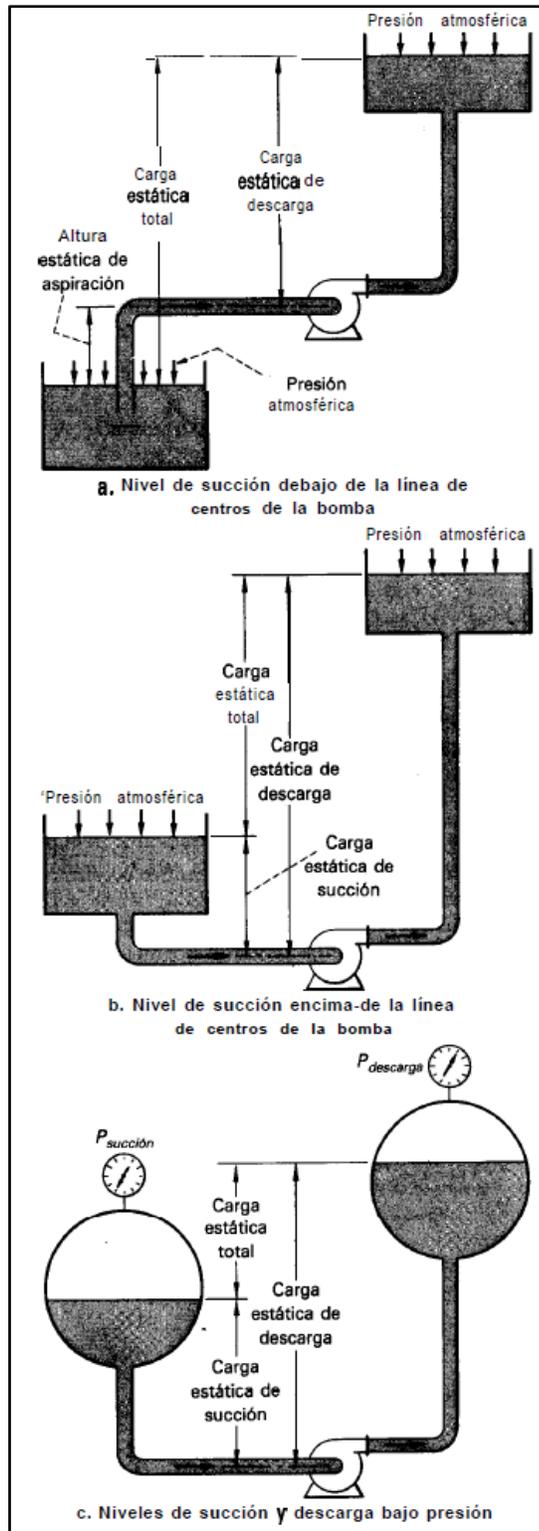


Figura 12 Definiciones de la carga estática total de un sistema

### 3.4 CARGA DE FRICCION.

La carga de fricción (expresada en ft del líquido que se bombea) es la necesaria para contrarrestar las pérdidas por fricción ocasionadas por el flujo del líquido en la tubería, válvulas, accesorios y otros componentes como pueden ser los intercambiadores de calor. Estas pérdidas varían más o menos proporcionalmente al cuadrado del flujo en el sistema. También varían de acuerdo con el tamaño, tipo y condiciones de las Superficies de tubos y accesorios y las características del líquido bombeado. Al calcular las pérdidas por fricción, se debe tener en cuenta que aumentan conforme la tubería se deteriora con el tiempo. Se acostumbra basar las pérdidas en los datos establecidos para tubería promedio que tiene 10 a 15 años de uso. Estos datos se encuentran con facilidad en la Hydraulic Institute Standards' y en el Manual de Bombas.'

### 3.5 PERDIDAS EN LA ENTRADA Y SALIDA.

Si la toma de la bomba está en un depósito, tanque o cámara de entrada, las pérdidas ocurren en el punto de conexión de la tubería de succión con el suministro. La magnitud de las pérdidas depende del diseño de la entrada al tubo. Una boca acampanada bien diseñada produce la mínima pérdida. Asimismo, en el lado de descarga del sistema cuando el tubo de descarga termina en algún cuerpo de líquido, se pierde por completo la carga de velocidad del líquido y se debe considerar como parte de las pérdidas totales por fricción en el sistema.

### 3.6 CURVAS DE FRICCION Y DE CARGA DEL SISTEMA.

Como se mencionó, las pérdidas por fricción en la entrada y la salida varían más o menos proporcionalmente al cuadrado del flujo en un sistema. Para resolver problemas de bombeo es conveniente indicar la relación, en forma de gráfica, entre la capacidad y las pérdidas de carga de fricción. Estas pérdidas, por tanto, se calculan con algún flujo predeterminado, sea el esperado o el de diseño, y luego se calcula para todos los demás flujos con el empleo del cuadrado de la relación de flujo. La curva resultante se llama curva de fricción del sistema (figura 13a). Cuando se combinan las cargas estáticas, la diferencia en presión y las pérdidas de carga de fricción de cualquier sistema, y se trazan contra la capacidad, la curva resultante (figura 13b) se llama curva de carga del sistema. Al superponer una curva de capacidad contra carga de la bomba a velocidad constante sobre esta curva de carga del sistema (figura 13b) se podrá determinar la capacidad en el punto en que se cruzan las dos curvas. Ésta es la capacidad que entregará al sistema esa bomba a esa

velocidad particular. En sistemas que tienen cargas estáticas o diferencias de presión variables, es posible trazar curvas que correspondan a las condiciones mínimas y máximas (figura 14). Después, las intersecciones con la curva de carga-capacidad de la bomba determinarán los flujos mínimo y máximo que entregará la bomba en el sistema.

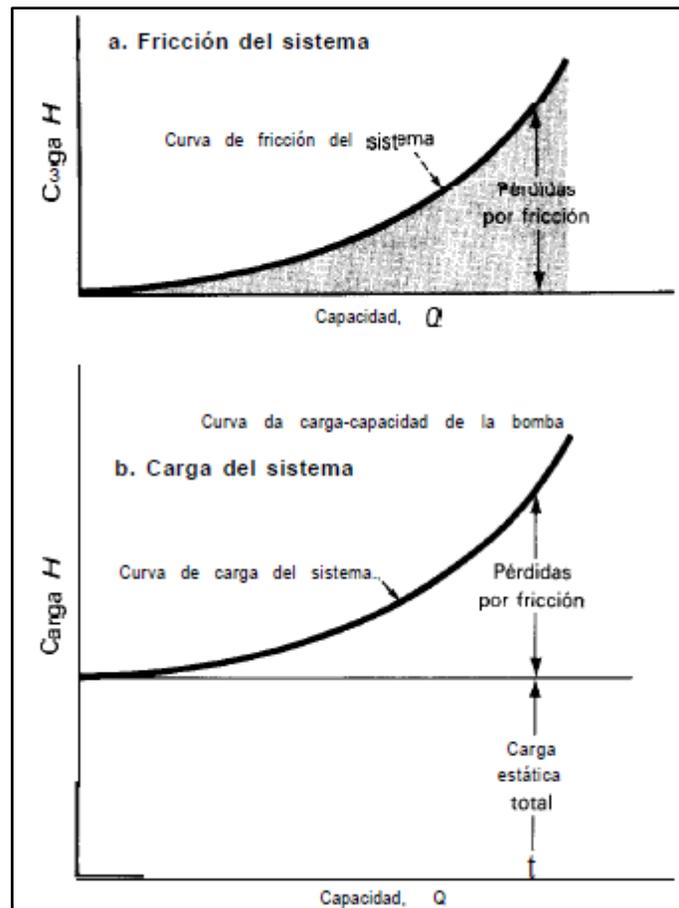
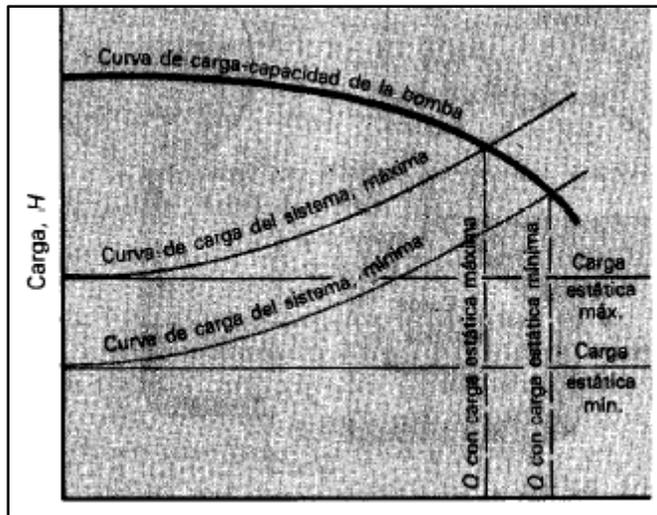


Figura 13 Curva de fricción del sistema y curva de carga del sistema.



*Figura 14 Características del sistema para una carga estática variable.*

### 3.7 VARIACIONES EN EL FLUJO DESEADO.

Es raro que un sistema deba funcionar con una sola capacidad fija. En general, el proceso en que trabaja la bomba centrífuga tiene demanda variable. Una bomba dada en un sistema dado sólo entregará la capacidad correspondiente a la intersección entre las curvas de carga contra capacidad y de carga del sistema. Para variar la capacidad es necesario cambiar la forma de una o de ambas curvas. Para cambiar la curva de carga contra capacidad se hace funcionar la bomba a velocidad variable (figura 15a). O bien, la curva de carga del sistema se puede alterar si se produce una pérdida por fricción con una válvula de estrangulación (figura 15b). Por supuesto, la diferencia entre la carga total producida por la bomba y la carga requerida por la curva de carga del sistema representa desperdicio de energía durante la estrangulación. Por otra parte, la casi totalidad de las bombas centrífugas actuales tienen propulsión con motores de inducción, de jaula de ardilla, de velocidad constante y la estrangulación en la descarga de la bomba es el único medio de obtener la capacidad variable deseada. Como se verá, la adopción de motores de frecuencia variable cambiará estos métodos.

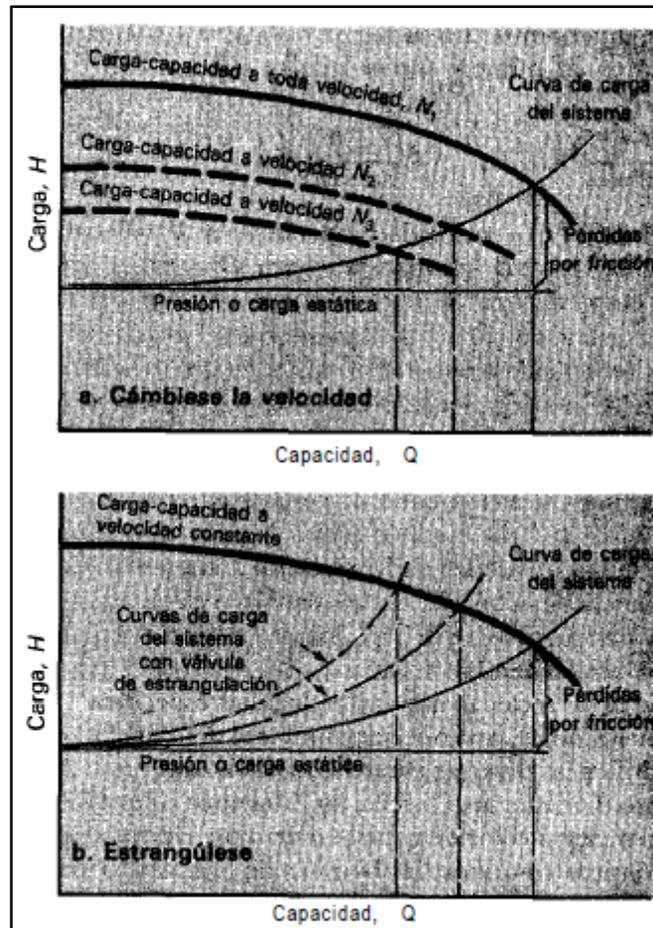


Figura 15 Características del sistema para una carga estática variable.

#### 4 LEYES DE AFINIDAD Y CURVAS DE CAPACIDADES NOMINALES.

El rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga incluye tres factores básicos: 1) la capacidad (expresada en unidad de volumen por unidad de tiempo, como GPM); 2) la carga total (expresada en pies del líquido que se bombea), y 3) la velocidad a la cual funciona la bomba (en rpm). El rendimiento o "comportamiento" de la bomba se presenta en forma de curvas (figura 16) en que la curva de carga contra capacidad se traza a una velocidad fija. La curva también indica el caballaje al freno requerido con diversos flujos y la eficiencia correspondiente de la bomba. La capacidad a la cual la bomba trabaja con más eficiencia se llama punto de máxima eficiencia (denominado a veces en inglés con las siglas b.e.p., best efficiency point). El trabajo útil que hace la bomba es el peso del líquido bombeado en un periodo, multiplicado por la carga producida por la bomba y se expresa en términos de caballaje, llamados caballos de agua (WHP).

Sería más correcto llamar a *WHP* caballos de líquido, que se determinan con:

$$WHP = \frac{QH(sp.gr.)}{3960} \quad (34)$$

En donde:

*WHP* = caballos de agua

*Q* = capacidad de la bomba GPM

*H* = carga total, ft.

La potencia requerida para la propulsión de la bomba son los caballos de agua divididos entre la eficiencia  $\eta$  de la bomba: Por tanto, al dividir la ecuación anterior entre esta  $\eta$  se tiene:

$$BHP = \frac{QH(sp.gr.)}{3960\eta} \quad (35)$$

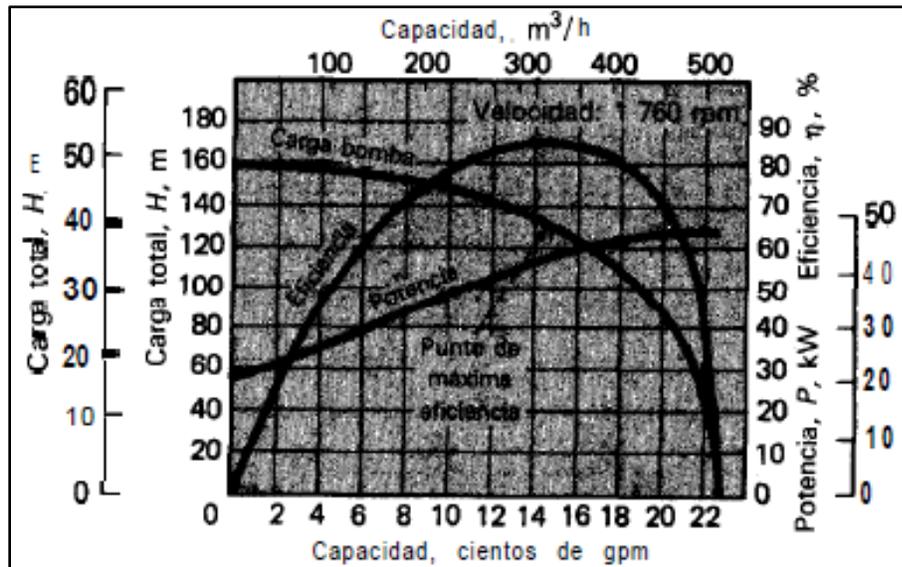


Figura 16 Características de rendimiento de una bomba centrífuga.

#### 4.1 LEYES DE AFINIDAD.

Las relaciones que permiten predecir el rendimiento de una bomba a una velocidad que no sea la de característica conocida de la bomba, se llaman leyes de afinidad. Cuando se cambia la velocidad:

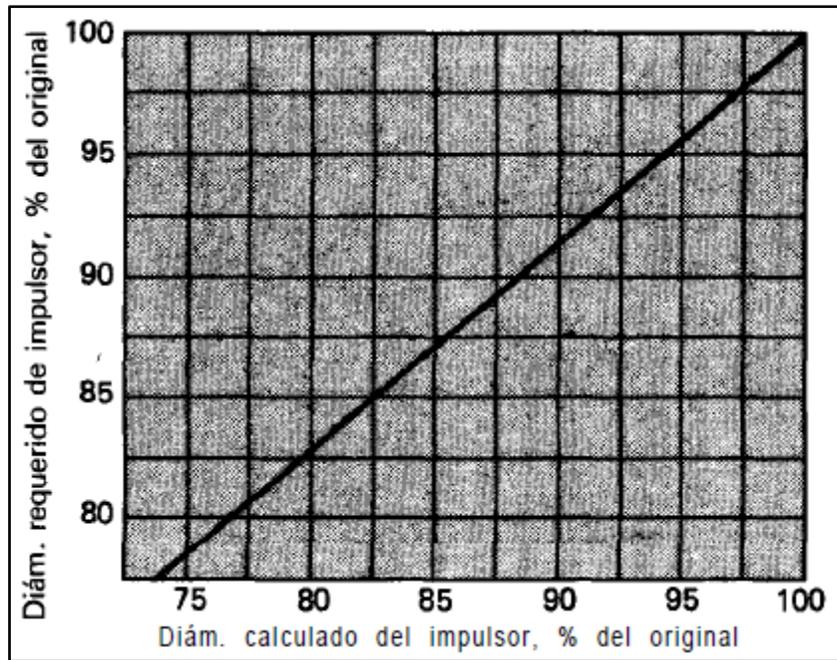
- 1) La capacidad  $Q$  en cualquier punto dado en la característica de la bomba varía directamente con la velocidad,  $n$ .
- 2) La carga  $H$  varía en razón directa al cuadrado de la velocidad.
- 3) El caballaje al freno  $P$  varía en razón directa al cubo de la velocidad. En otras palabras, si se asigna el subíndice 1 a las condiciones en las cuales se conocen las características y el subíndice 2 denota las condiciones a alguna otra velocidad, entonces:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}; \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \quad (36)$$

Estas relaciones se pueden utilizar sin peligro para cambios moderados en la velocidad. Las ecuaciones anteriores quizá no sean igual de exactas para cambios grandes en la velocidad. Hay leyes de afinidad similares para los cambios en el diámetro  $D$  del impulsor, dentro de límites razonables de reducción del impulsor. En otras palabras:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1}; \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2; \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 \quad (37)$$

Ocurren ciertas desviaciones de estas leyes incluso con reducciones más o menos pequeñas. En la figura 17 se ilustra la reducción recomendada en relación con la reducción teórica.



*Figura 17 Valores de diámetros recomendados para impulsores de menor tamaño.*

## CAPITULO 2.

### EL VARIADOR DE VELOCIDAD, REQUERIMIENTOS DE MOTORES OPERADOS BAJO VARIADORES DE VELOCIDAD.

---

#### 1 EL VARIADOR DE VELOCIDAD (VSD)

Un variador de velocidad está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT (transistor bipolar de puerta aislada) o tiristores, permiten el control completo de motores eléctricos de inducción, los hay de C.C. (variación de la tensión), y de C.A. (variación de la frecuencia), los más utilizados son los de motor trifásico de inducción y rotor sin bobinar (jaula de ardilla.) El variador de velocidad para motores asincrónicos trifásicos (VSD, por sus siglas en inglés Variable Speed Drive), llamado también "inverters", utilizando un término técnico inglés, son dispositivos automatizados de control para poder controlar la velocidad en los motores asincrónicos.

Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua también puede ser designada como variador de velocidad.

Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna. A esta segunda etapa también se le suele llamar oscilador.

Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de inversor.

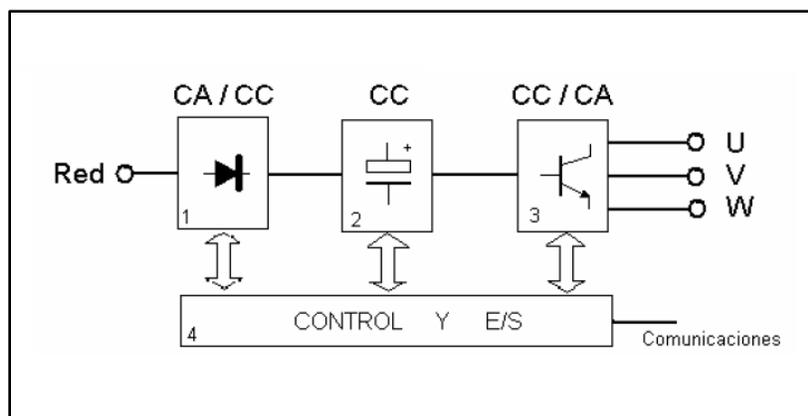


Figura 18 Esquema en bloque de un variador de velocidad.

- ❖ Rectificador: partiendo de la red de suministro de C.A., monofásica o trifásica, se obtiene c.c. mediante diodos rectificadores.
- ❖ Bus de continua: condensadores de gran capacidad (y a veces también bobinas), almacenan y filtran la C.C. rectificada, para obtener un valor de tensión continua estable, y reserva de energía suficiente para proporcionar la intensidad requerida por el motor.
- ❖ Etapa de salida: desde la tensión del bus de continua, un oscilador convierte esta energía en una salida trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. Como elementos de conmutación, se usan principalmente transistores bipolares (BJT), CMOS o similares, IGBT, tiristores (SCR), GTO... etc. Las señales de salida, se obtiene por diversos procedimientos como *troceado*, mediante ciclo convertidores, o señales de aproximación senoidal mediante modulación por anchura de impulsos PWM.
- ❖ Control y E/S: circuitos de control de los diferentes bloques del variador, protección, regulación... y entradas y salidas, tanto analógicas como digitales. Además se incluye el interfaz de comunicaciones con buses u otros dispositivos de control y usuario.

## 2 FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DE LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DE VELOCIDAD EN MOTORES.

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

Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie, una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión regulables, que dependerán de los valores de consigna, a esta segunda etapa también se le suele llamar oscilador, todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de inversor.

El modo de trabajo puede ser manual o automático, según las necesidades del proceso, dada la enorme flexibilidad que ofrecen los reguladores de velocidad, permitiendo hallar soluciones para obtener puntos de trabajo óptimos en todo tipo de procesos, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual.

La mayoría de las marcas incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, tales como protecciones contra sobre corriente, sobre temperatura, fallo contra desequilibrios, defectos a tierra, etc., además de ofrecer procesos de arranque y frenados suaves mediante rampas de aceleración y de frenado, lo que redundará en un aumento de la vida del motor y las instalaciones.

Como debe saberse, el uso de convertidores de frecuencia añade un enorme potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor en muchas aplicaciones.

## 3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.

Ventajas.

- ❖ No tienen elementos móviles, ni contactos, como en el caso de los contactores.
- ❖ Permite arranques suaves, sin transiciones o saltos.
- ❖ Posibilidad de ajustar en tiempo la rampa de aceleración del motor.
- ❖ Ahorrar energía cuando el motor funciona parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia.
- ❖ Detectar y controlar la falta de fase a la entrada y salida del equipo.
- ❖ Mejor rendimiento del motor.

- ❖ El equipo no tiene limitación en cuanto al número de arranques, como sucede con la vida de los contactos.

Desventajas.

- ❖ Limitación de la corriente de arranque.
- ❖ Limitación en el par de arranque.

#### 4 FUNCIONES DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD.

Las principales funciones son:

- ❖ Arranque y regulación de velocidad, frenado de desaceleración y frenado de parada.
- ❖ Ahorro de energía.
- ❖ Regulador PI - PID (caudal, presión.).
- ❖ Recuperación automática con selección de velocidad.
- ❖ Velocidades preseleccionadas, marcha paso a paso.

#### 5 PRINCIPALES TIPOS DE VARIADORES DE VELOCIDAD.

Los variadores son convertidores de energía encargados de modular la energía eléctrica que recibe el motor. Los tipos de variadores más habituales son:

##### 5.1 RECTIFICADOR CONTROLADO.

Suministra corriente continua a partir de una red alterna monofásica o trifásica y controla el valor medio de la tensión.

La variación de dicha tensión se obtiene mediante la modificación del ángulo de retardo en el momento del cebado de los semiconductores de potencia.

Este tipo de variador se utiliza para alimentar motores de corriente continua, generalmente de excitación separada.

##### 5.2 CONVERTIDOR DE FRECUENCIA.

Suministra tensión alterna a partir de una red alterna monofásica o trifásica de frecuencia fija, con valor eficaz y frecuencia variables según una ley  $\frac{V}{F}$  constante, se utiliza como variador de velocidad para motores asíncronos de jaula.

### 5.3 REGULADOR DE TENSIÓN.

Suministra corriente alterna a partir de una red alterna monofásica o trifásica, con la misma frecuencia fija que la red y controlando el valor eficaz de la tensión. La variación de dicha tensión se obtiene mediante la modificación del ángulo de retardo en el momento del cebado de los semiconductores de potencia.

Generalmente, se utiliza como arrancador progresivo para motores asíncronos de jaula estándar, siempre que no requieran un par de arranque elevado.

### 5.4 VARIADORES ELÉCTRICOS - ELECTRÓNICOS

Existen cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos:

### 5.5 VARIADORES PARA MOTORES DE CC:

El variador CC tiene dos componentes: El convertidor y el regulador. Una vez que se obtiene la orientación del campo, el torque del motor CC se controla fácilmente variando la corriente de armadura y manteniendo la corriente de magnetización constante.

## 6 VARIADORES PARA MOTORES DE CA CONOCIDOS COMO VARIADORES DE FRECUENCIA.

El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando con ello modificar su velocidad. Sin embargo, se debe tener presente que el cambio de frecuencia debe estar acompañado por un cambio del voltaje aplicado al motor para no saturar el flujo magnético dentro del rotor.

Los variadores de frecuencia permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción (asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado), como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$N_s = \frac{120F}{P} \quad (38)$$

Cuando se trata de motores de inducción, se tiene:

$$N_M = \frac{120F*(1-s)}{P} \quad (39)$$

Dónde:

$N_s$  = velocidad síncrona (rpm)

$N_m$  = velocidad mecánica (rpm)

$f$  = frecuencia de alimentación (Hz)

$s$  = deslizamiento (adimensional)

$P$  = número de polos.

Como puede verse en las ecuaciones anteriores la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina.

Estos variadores mantienen la razón Voltaje/Frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida.

## 7 CONSIDERACIONES PARA LA ELECCIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD.

Antes de mencionar cuales son los parámetros que se deben de tener en cuenta para la correcta selección de un variador de velocidad para un motor de inducción debemos hacer mención sobre en qué consiste un sistema de velocidad variable y las partes que lo componen.

Un sistema de velocidad variable en la actualidad con el uso de la electrónica de potencia que ha tenido un desarrollo sorprendente son capaces de convertir la energía eléctrica tomada de la red eléctrica del sistema industrial en energía mecánica manteniendo controlado los procesos de conversión.

Dicho sistema de velocidad variable se compone de los siguientes equipos:

- ❖ Un conjunto de dispositivos eléctricos y electrónicos que entrega y controla la energía eléctrica al motor. El más importante es el variador de velocidad, acompañado de elementos de maniobra tales como interruptor de potencia,

contactores asociados, elementos de comando y señalización, mini interruptores y otros elementos menores.

- ❖ Un motor eléctrico trifásico de inducción tipo jaula de ardilla (con rotor en cortocircuito).
- ❖ Un sistema de transmisión mecánica, que transmite la energía desde el motor hacia la carga (máquina accionada), adaptando la velocidad a la necesidad del proceso. Importante tener en cuenta que a pesar de que el variador de velocidad logra operar el motor a bajas velocidades, la transmisión no puede obviarse siempre, pues la transmisión no solamente baja la velocidad sino que aumenta el torque en la salida.

Como resultado del trabajo en conjunto de los elementos anteriores podemos obtener un movimiento controlado de un proceso industrial. Entre esos procesos podemos mencionar el control sobre una bomba centrífuga, la cual, es utilizada para los procesos de tratamientos de agua potable para el consumo humano.

De todo lo mencionado anteriormente el bloque de fuerza que se necesita en la industria es el motor de inducción. Debemos recordar que de acuerdo a la aplicación así es la elección del tipo de motor. Por tanto el motor de inducción es el más utilizado en la industria por los siguientes factores:

- ❖ Altos niveles de eficiencia comparado con otros tipos de motor.
- ❖ Bajos costos de mantenimiento.
- ❖ Bajo costo y facilidad de adquisición.
- ❖ Altos grados de protección y posibilidad de uso en áreas clasificadas.

Por su parte el variador de velocidad (conocido también como Drive, VSD, o variador de frecuencia) se compone de elementos propios de la electrónica de potencia que acciona a un motor de rotor tipo jaula de ardilla y que a su vez acciona al motor para realizar arranques y paradas suaves. El principio de operación de todo variador está ligado a las siguientes relaciones de un motor de inducción:

$$n_s = \frac{120 * f}{p} \quad (40)$$

Dónde:

Ns es la velocidad síncrona

F es la frecuencia del sistema (en nuestro caso es 60 Hz)

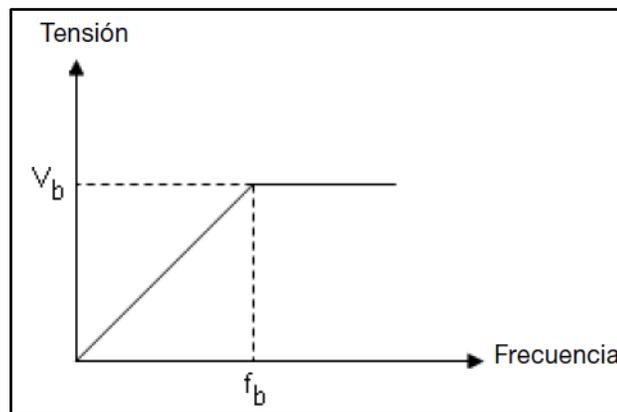
P es el número de polos del motor.

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{th}^2 R_2 / s}{\omega_{sinc} [(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2]} \quad (41)$$

Las ecuaciones anteriores no muestran que para obtener un buen control de velocidad por parte de un VSD hay dos parámetros de interés sobre los cuales se debe tener un interés especial. El primero de ellos es la frecuencia ya que como se muestra en la expresión de la velocidad síncrona el número de polos de una maquina no puede ser manipulado, pero sin embargo, la frecuencia si puede ser controlada para poder hacer el control en una amplia ventana de variaciones de frecuencia.

Siendo específicos los variadores que se encuentran entre los distintos proveedores de equipos de control industrial nos ofrecen variadores que logran disminuir la frecuencia de operación de un motor hasta 0.1 Hz y aumentarla hasta 200 Hz, pero, como es de esperar, los motores que soportan esas velocidades poseen ciertos requerimientos de enfriamiento y aislamiento que más adelante se discutirán.

El segundo parámetro de interés es la tensión de alimentación del variador al motor. De la ecuación del par o torque inducido observamos que la tensión de thevenin es la que el variador debe de proporcionar al motor de inducción para su respectiva alimentación. Y además de eso en la relación de par inducido está presente la frecuencia angular síncrona que no es más que la velocidad síncrona en términos de revoluciones. Entonces a la luz de estas ecuaciones se entiende que la relación de tensión/frecuencia debe de ser lineal para el incremento o decremento de la velocidad del motor y por ende mantener un par inducido constante.



**Figura 19** Relación lineal entre la tensión y frecuencia entregada a un motor de inducción por parte de un VSD.

En la figura 19 vemos que la tensión  $V_b$  es la tensión base o tensión especificada del sistema de alimentación del motor y la frecuencia  $f_b$  es la frecuencia base del sistema y que a su vez corresponde a la del motor utilizada.

La elección de un VSD radica en hacer un análisis muy minucioso sobre varios aspectos, uno de ellos es la aplicación sobre la cual estamos buscando una solución que sea factible en cuanto a la parte técnica, y que, a su vez sea la solución que genere un ahorro energético y económico considerable. A continuación veremos algunas recomendaciones de muchos de los fabricantes de VSD's al momento de la elección de un equipo de control para motores de inducción.

### 7.1 RESUMEN PARA ELECCION DEL VARIADOR DE VELOCIDAD

Para elegir el variador de velocidad más adecuado, necesitamos conocer:

- ❖ La tensión de alimentación del motor
- ❖ La potencia del motor
- ❖ Aplicación es severa (mucho par de arranque), o estándar
- ❖ Las peculiaridades de control (si se desea control a distancia, o introducir los parámetros directamente sobre el variador).

Con ellos podemos acelerar y desacelerar a voluntad, controlar la velocidad y mantener el factor de potencia.

## 8 ¿CUÁL ES EL TIPO DE CARGA EN LA QUE SE IMPLEMENTARA LA MAQUINA?

El primero de los análisis que se debe de realizar es acerca de la carga. No podemos hacer una selección de un motor, y por consiguiente, la de un variador si no tenemos bien claro el tipo de carga bajo la cual nos encontramos. Surge la pregunta ¿y porque debo de conocer el régimen de carga bajo la cual operara el motor? Porque como lo vimos con anterioridad el variador mantiene el control sobre la tensión y frecuencia de operación del motor de inducción y dicho sea de paso esos parámetros inciden de una manera directa en el par inducido de la máquina. A continuación mencionamos algunas de las cargas típicas en la industria:

Torque constante.	Extrusoras, trefiladoras, compresores reciprocantes y bandas transportadoras.
Torque lineal.	Prensas y calandras.
Torque cuadrático.	Bombas centrifugas y ventiladores.
Torque hiperbólico.	Maquinas bobinadoras y desembobinadoras.
Torque indefinido.	Mesas alimentadoras.

*Tabla 1 Tipos de carga y aplicaciones.*

Un criterio de selección del motor y variador de parte de los fabricantes es la de asumir la carga del sistema como una carga que demande un torque constante, pero, con las excepciones sobre los sistemas de bombeo de agua potable ya que la relación del par inducido es cuadrático.

#### 9 ¿LA APLICACIÓN ES UN NUEVO PROYECTO O SE TRATA DE AUTOMATIZAR UNA APLICACIÓN YA EXISTENTE?

La selección de un variador responde a esta pregunta en el sentido de que la aplicación puede tratarse de un diseño totalmente nuevo y por consiguiente hay una buena oportunidad para profundizar en aspectos claves como por ejemplo si el motor de inducción a utilizar es del tipo "Duty Cycle", las longitudes de los alimentadores son las recomendadas por el fabricante del variador, el tipo de subestación que se utilizara es la más adecuada para los requerimientos del variador, etc.

Ahora viene la parte contraria al análisis anterior. Cuando una aplicación ya está trabajando y se piensa automatizar el proceso hay detalles que entran en juego que no pueden ser ignorados. Al inicio hablamos sobre que el variador disponible en el mercado nos ofrece una ventana de variación de frecuencia en el rango de 0.1-200 Hz, pero, conviene preguntarnos ¿el motor utilizado soportara esas variaciones de frecuencia? En la mayoría de casos los motores utilizados no cumplen con esas características ya que pueda ser que son motores de eficiencia Premium, poseen bajo nivel de aislamiento, o que el sistema de transmisión no nos permita realizar cambios en la velocidad.

Conviene analizar también si las cargas nos permiten realizar cambios en la velocidad del motor, y si, se concluye que la carga no admite una ventana de variación de frecuencia muy amplia se procede a restringir a un menor rango las variaciones de velocidad. Un ejemplo de ello son los sistemas de bombeo ya que se fijan a una presión constante debido al tipo de tubería con la que fue diseñado el sistema.

## 10 ¿ES NECESARIO EL CONTROL DE VELOCIDAD EN LA APLICACION INDUSTRIAL?

Hay muchos métodos de control de arranque en los motores de inducción. Los más conocidos y por ende los más utilizados son el arranque directo, que no es más que conectar directamente el motor a la red eléctrica del sistema. Otro método utilizado es el arranque estrella-delta que se auxilia de contactores para realizar la primera configuración para minimizar la corriente de arranque del motor y luego se accionan los contactores para hacer el conexionado de las bobinas del motor en delta para darle la fuerza necesaria para operar y por último se ubica el arranque por auto-transformador en el cual se reduce la tensión de alimentación mediante un autotransformadores. En el proceso de arranque el número de espiras del secundario no se reduce, luego la relación de transformación es constante aunque puede regularse de cara a un siguiente arranque en función del par resistente de la carga.

En base a lo anterior podemos decir que el VSD toma todos los arranques anteriores y los mejora en el sentido de que el en sí mismo posee la cualidad de ser un arrancador suave y además por estar constituido de la electrónica de potencia y control ya que los arranque citados no ofrecen la opción de control y por eso se vuelve atractivo el uso de variadores en la industria.

Pero el uso de los variadores no solo se limita al hecho de reemplazar las antiguas configuraciones de arranques de motores sino que en el sentido operativo del motor mejora el factor de potencia, disminuye la corriente de arranque, el motor puede desarrollar pares de arranques muy altos. Ante esas condiciones es conveniente realizar no solo un análisis técnico sobre las mejoras que traería el uso de un VSD sino también en los ahorros en la factura eléctrica de la planta industrial.

## 11 ESTABLECIENDO EL RANGO DE VARIACIÓN DE VELOCIDAD EN FUNCIÓN DE LA CARGA Y EL MOTOR.

Si bien los variadores nos permiten un margen de variación en cuanto a la relación tensión/frecuencia pero eso nos permite asumir que el motor responderá de la misma manera ante ese tipo de variaciones. En los motores de eficiencia estándar reducir la velocidad por debajo del 50% de su velocidad nominal significa un problema de enfriamiento ya que en su mismo eje se colocan aspas que extraen el calor de los devanados del estator, en ese tipo de situaciones será necesario proveer al motor de un sistema de enfriamiento forzado para evitar el calor que se generara en los devanados del motor. Cuando la velocidad del motor cae por debajo del 10% de su velocidad nominal en los VSD no muy robusto el par se reduce de una manera considerable ya que por lo general se utiliza el control escalar. El control vectorial es un tipo de control que los VSD's más robustos poseen y dicho control se centra en proveer un flujo constante al motor para no ver disminuido el valor del torque del motor.

## 12 CUAL ES EL CICLO DE TRABAJO.

Lo anterior está ligado al ciclo de trabajo bajo el cual estará la maquina operando. Entenderemos por ciclo de trabajo al porcentaje del tiempo total de operación al que estará el motor a una determinada velocidad. Debe compararse el torque del motor contra el torque de la carga y evaluar contra el ciclo de carga: no hay otra forma de determinar la utilización de estos accesorios. En este punto hay que determinar con la mayor precisión posible cuál será el comportamiento dinámico del sistema completo, incluyendo motor, sistema de transmisión y carga asociada: los tiempos de aceleración, tiempos de desaceleración, torque de arranque de motor, tipo de transición de torque desde motor hacia carga, etc.

No todas las cargas se comportan igual; a pesar de que los VSD's tienen muchas capacidades por firmware y software, no todas estas son aplicables a todas las cargas de manera simultánea. Por ejemplo, no es usual que un sistema de velocidad variable se aplique a una bomba centrífuga y se pretenda bajar la velocidad por debajo del 70% de su velocidad nominal, ni subir la velocidad por encima de su velocidad nominal. Velocidades más bajas traen como consecuencia presiones muy bajas y cero conducciones de fluido, con el consecuente daño mecánico de la bomba; velocidades muy altas traen como consecuencia una sobrecarga elevada en motor, con la inmediata consecuencia de salida de funcionamiento del sistema completo por sobrecorriente o sobrecarga.

### 13 DATOS DE PLACA NOMINALES DEL MOTOR.

Hablando de motores eléctricos, es una costumbre referirse a ellos solamente relacionando la potencia. Yendo más a fondo, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros de motor:

- ❖ Potencia en kilovatios (kW) o en caballos de potencia (HP)
- ❖ Tensión nominal en voltios (V)
- ❖ Frecuencia nominal en ciclos por segundo (Hz)
- ❖ Corriente nominal en amperios (A)
- ❖ Velocidad nominal en revoluciones por minuto (rpm)

El dato de potencia en un variador es indicativo y generalmente está relacionado con un motor estándar de 2 ó 4 polos. Motores especiales, o motores de 6 ó más polos tienen menores niveles de eficiencia y factor de potencia; con un valor de corriente generalmente mayor. Siempre debe hacerse la selección de manera que la corriente del variador de velocidad sea superior a la corriente nominal del motor.

### 14 DATOS NOMINALES DE LA RED ELECTRICA.

En nuestro mercado las principales tensiones en redes industriales en baja tensión son 220 V, 440 V, 460 V. Otros niveles de tensión son utilizados, pero no son tan comunes. El motor jaula de ardilla fácilmente puede tener un diseño interno que mediante un arreglo determinado de los cables puede ser conectado en tensiones 220 V ó 440 V. Por la manera en que está construido un variador de velocidad no puede conectarse indistintamente en cualquiera de las redes indicadas previamente. Se consiguen usualmente equipos con rango de tensión de 200 a 240 V, de 220 a 230 V, de 380 a 480 V. También debemos recordar que para niveles de potencia superiores (por encima de 500 HP), los motores tienden a ser especificados en media tensión, es decir, 4160 V. Cuando se piensa en estos niveles de tensión, lo más importante es encontrar un conjunto drive-motor que nos ofrezca amigabilidad, flexibilidad, eficiencia y confiabilidad. Las redes en Europa y en otros países son en 50 Hz. Las redes en Estados Unidos, Centro y Suramérica son en 60 Hz. Otra más de las ganancias con el uso de los variadores de velocidad es la posibilidad de utilizar máquinas diseñadas para redes de 50 ó 60 Hz, en redes con la otra frecuencia nominal, pues el VSD puede dar en la salida una tensión y frecuencia diferentes de la tensión y frecuencia de entrada (red).

## 15 CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES DE OPERACIÓN DE LOS VARIADORES.

Al igual que los motores eléctricos convencionales, los variadores de velocidad tienen un Sistema de refrigeración que depende del aire de ventilación. De esta manera, las condiciones de altura sobre el nivel del mar y temperatura ambiente afectarán positiva o negativamente la refrigeración del variador. Usualmente deberá hacerse una disminución de potencia efectiva del equipo si se sobrepasan las condiciones de norma (1000 msnm y 40°C). También tenemos otros aspectos asociados como son las características propias del aire ambiente. Dentro de estas podemos mencionar:

- ❖ Polvo magnético
- ❖ Polvo conductivo
- ❖ Humedad
- ❖ Área clasificada

En la gran mayoría de los casos, los variadores de velocidad deberán ser instalados dentro de tableros o gabinetes que deberán cumplir unas características mínimas. Para que el equipo tenga un funcionamiento libre (en lo posible) de errores “fatales” las recomendaciones del fabricante deben seguirse detalladamente según el manual de usuario.

## 16 COMO SERA EL MONITOREO DEL EQUIPO.

Un variador de velocidad está provisto de entradas y salidas analógicas y digitales que nos ayudan a realizar la parte de control ya sea de una manera puramente manual para el equipo de mantenimiento así como de un monitoreo en una caseta de control. El variador cuenta con las siguientes entradas y salidas:

- ❖ Entradas digitales DI
- ❖ Salidas digitales DO
- ❖ Salidas de relé RO (se diferencian de las anteriores por tener capacidad de conexión en tensiones industriales a 110 o 220 V)
- ❖ Entradas analógicas AI
- ❖ Salidas analógicas AO

Mediante las entradas digitales (contactos abiertos o cerrados) se da al VSD órdenes tales como: habilitación general de funcionamiento, marcha/paro con selectores, marcha/paro con pulsadores, cambio de sentido de giro (posible en un VSD sin

necesidad de contactores), marcha en velocidades predeterminadas (tener en cuenta cuántas se requerirán), marcha en velocidad de prueba, indicación de error externo, selección de lugar de control, control de velocidad del tipo de potenciómetro electrónico, activación de controlador PID, entre otras. Los variadores modernos tienen 4 ó 6 DI, siendo posible ampliar este número con el uso de tarjetas expansoras de entradas.

Las entradas analógicas (señales de 0 a 10 V DC o de 0 a 20 mA DC) son usadas para dar referencia de velocidad al VSD. Esta referencia puede provenir sencillamente de un potenciómetro industrial, como también de un PLC o directamente de un transductor de alguna variable de proceso: presión, caudal, nivel, temperatura, humedad relativa, masa, velocidad lineal, etc. En el caso del controlador PID interno, esta señal será considerada como valor real. Es común encontrar VSD con 1 AI ó 2 AI; también es posible ampliar este número con tarjetas expansoras.

Las salidas de relé o salidas digitales tienen el objetivo de visualizar el estado del VSD así como ciertos eventos que se quiere visualizar o indicar al sistema superior. Las siguientes son las indicaciones que generalmente se pueden dar a través de estas salidas: convertidor listo, en marcha, con error, velocidad real igual a una velocidad predeterminada, velocidad real superior/inferior a una velocidad predeterminada, torque igual a un torque predeterminado, torque superior/inferior a un torque predeterminado. La cantidad de ROs y DOs del equipo varía dependiendo de la línea de VSD, pero también puede ser expandible.

Las salidas analógicas son proporcionales a ciertas variables del VSD. Es posible dar indicación a mandos externos de los siguientes parámetros: corriente de convertidor, velocidad de referencia, velocidad de salida, tensión en el circuito intermedio, tensión aplicada a motor, potencia de salida, torque de salida, variable proporcional a la velocidad (variable de proceso: no directamente sino por proporcionalidad a la velocidad de salida), etc.

## 17 CALIDAD DE SERVICIO ELECTRICO DE LA RED DEMANDADO PARA OPERACIÓN DEL VARIADOR

### 17.1 LA RED.

Las principales características que identifican de la red eléctrica son la tensión y frecuencia. En El Salvador la frecuencia es de 60Hz, al igual que en Norteamérica, Centroamérica y Suramérica, mientras que en Europa la tensión normalizada es 50 Hz. Dada la diversidad de tamaños de industrias, no hay una única tensión, por lo que es usual que los motores tenga doble tensión generalmente 240/480.

Se acostumbra a que los motores con potencias de 10 HP o superiores sean aptos para el arranque Estrella-Triángulo, con el objetivo de que la red no se desestabilice por las altas corrientes consumidas durante el arranque directo. De esta forma, para las potencias mencionadas los motores Standard. Esta característica los hace aptos para funcionar prácticamente en cualquier red.

## 18 EL ARRANQUE

Uno de los momentos más críticos para el motor, la red y la carga es el arranque. Por sus características propias, el motor jaula de ardilla consume durante el arranque una corriente que puede oscilar entre 5 y 8 veces la corriente nominal.

El arranque es el periodo en el que el motor hace la transición desde su estado de reposo hasta su velocidad de régimen. Para la red, la mejor condición de arranque es aquella en que este tiempo de transición es el mínimo posible y la corriente consumida es la mínima posible. Para el motor, la mejor condición de arranque es la que garantiza el menor calentamiento. Para la carga, la mejor condición es aquella que garantiza los menores desgastes mecánicos. En general, el tipo de arranque de cada aplicación debe ser analizado adecuadamente para lograr el mejor equilibrio entre las tres parte mencionadas previamente. Las características de curva de carga y momento de inercia tanto de motor como de carga, deberían ser consideradas en este análisis. Junto con criterios técnicos se considerarán criterios económicos.

Existen los siguientes tipos de arranque:

- ❖ Directo. El motor tendrá una corriente de arranque normal (hasta ocho veces la corriente nominal) y un par de arranque normal.
- ❖ Estrella-Triángulo. La corriente y el torque se reducen a la tercera parte (hasta tres veces la corriente nominal).
- ❖ Por Autotransformador. El autotransformador es fabricado para entregar al motor una tensión menor de la nominal. Esta tensión puede estar entre el 30% y el 70% dependiendo de la aplicación. La corriente y el torque variarán en proporción cuadrática a la tensión de alimentación.
- ❖ Arranque electrónico suave. En este método, el arrancador alimenta el motor con una tensión reducida y gradualmente aumenta la tensión hasta la tensión de régimen. El comportamiento inicial de la corriente y el torque será idéntico al método 3, pero el comportamiento durante todo el periodo de transición dependerá de la manera como el arrancador suave sea controlado.
- ❖ Variador de velocidad (o variador de frecuencia). Mediante este método, se logra limitar la corriente de arranque a valores de hasta dos veces la corriente nominal, mientras se obtiene un torque de arranque adecuado para cualquier aplicación. Además, la transición será la más suave posible de todos los métodos. Mecánicamente, es la mejor forma de hacer la operación, además de que permite realizar control de velocidad preciso, gracias a los avances de la electrónica de potencia y control.

En los primeros tres métodos se da una transición brusca desde el reposo hasta su velocidad nominal.

En los métodos 2 y 3, adicionalmente se da una transición desde el estado de tensión reducida a tensión nominal. En el método 4, se logra una transición menos brusca, pero aún con algunos saltos, pues lo que se está controlando es la tensión de alimentación. En el método 5, se logra una transición mucho más suave, pues se está controlando efectivamente la velocidad del motor y de la carga.

## 19 DETALLES DE LA INSTALACION DE VARIADORES DE VARIADORES.

A continuación se enuncian detalles eléctricos que se deben de tener en cuenta sobre la instalación de variadores. Analizaremos parámetros que tienen que ver con la calidad de potencia así como consejos prácticos para mejorar el rendimiento del bloque motor más variador.

## 19.1 ARMONICOS.

El sistema (motor + convertidor de frecuencia) es visto por la fuente de alimentación como una carga no lineal, cuya corriente posee armónicas (componentes de frecuencias múltiplos de frecuencia de la red). De manera general, el rectificador produce armónicas características de orden  $h = np+1$  en el lado CA, o sea, en la red ( $p$  es el número de pulsos del convertidor y  $n = 1, 2, 3$ ). Así, en caso del puente rectificador con 6 diodos (6 pulsos), las principales armónicas generadas son la 5a y la 7a, cuyas amplitudes pueden variar de 10% a 40% de la fundamental dependiendo de la impedancia de red. Ya para 12 pulsos (12 diodos) las armónicas más expresivas son la 11a y la 13a. Las armónicas superiores generalmente poseen menor amplitud y son más fáciles de filtrar.

El parámetro que demuestra en cuanto las armónicas pueden causar distorsión en la red es el THD (Distorsión armónica Total), suministrado por el fabricante del convertidor y definido como:

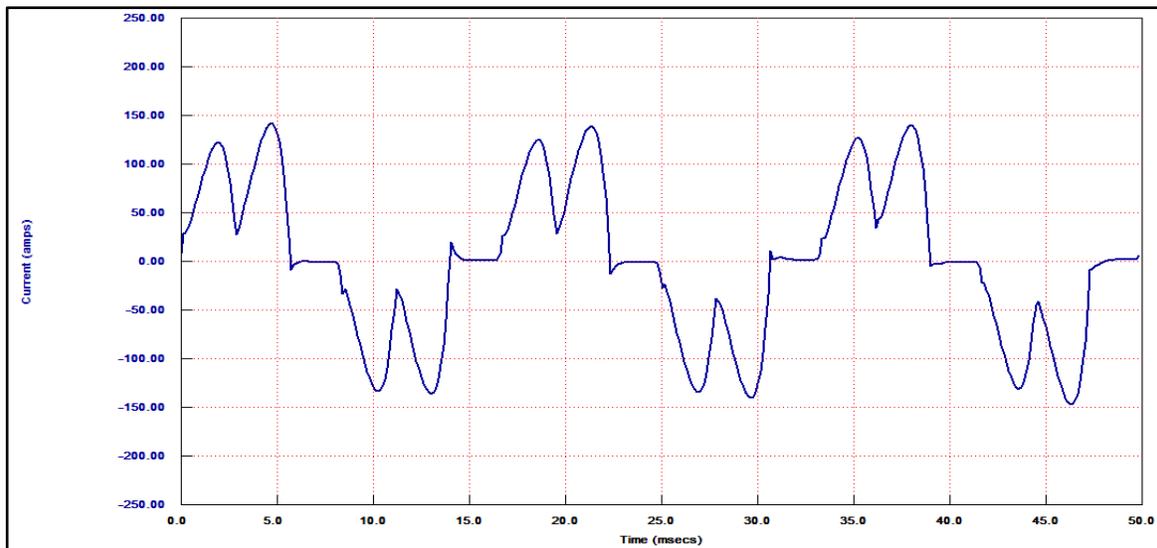
$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_h}{A_1}\right)^2} \quad (42)$$

Dónde:

An son los valores eficaces de las componentes armónicas

A1 es el valor eficaz de la componente fundamental

La figura 20 representa la forma de onda de la corriente medida en la entrada de un convertidor PWM de 6 pulsos, para una red de baja impedancia.



*Figura 20 Forma de onda de corriente medida la entrada de un variador de velocidad.*

## 19.2 ASPECTOS NORMATIVOS EN CUANTO AL CONTENIDO ARMONICO.

La NEMA Application Guide for AC ASD Systems hace referencia a la norma IEEE Std.519 (1992), que recomienda límites de THD para sistemas con tensión  $\leq 69$  kV presentado en la tabla 2. Esta norma define valores para la instalación final, siendo necesario el análisis de cada caso. Datos como impedancia de cortocircuito de la red, puntos de conexión común (PCC) del convertidor y otras cargas, entre otros, influyen en los valores recomendados.

Armónicas de tensión	
Todas pares	3%
Todas impares	3%
THD tensión	5%

*Tabla 2 Maxima distorsion armonica recomendada.*

La máxima distorsión en corriente recomendada por la IEEE- 519 es dada en términos del TDD (Distorsión Total de Demanda) y depende de la relación (ISC / IL), donde ISC es la máxima corriente de cortocircuito en el PCC y IL es la máxima corriente de demanda de la instalación (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

Armónicas de corriente impares (las corrientes armónicas pares están limitadas en 25% de las impares)						
Máxima distorsión armónica de corriente (porcentual en relación a IL)						
Isc/IL	< 11	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

*Tabla 3 Maxima distorsion armonica de corriente.*

### 19.3 REACTANCIA DE RED/INDUCTOR DE LINK DC.

Las corrientes armónicas, que circulan por las impedancias de la red de alimentación y dependen de los valores de las impedancias presentes en el circuito de entrada/salida del rectificador, causan caídas de tensión armónicas, distorsionando la tensión de alimentación del propio convertidor o de otros equipamientos conectados a la red. Estas distorsiones armónicas de corriente y tensión pueden ocasionar un bajo factor de potencia, además de aumentar las pérdidas eléctricas en las instalaciones con sobrecalentamiento de componentes tales como cables, transformadores, motores, bancos de capacitores, etc.

Para reducir el contenido armónico de la corriente y aumentar el factor de potencia puede ser instalada una inductancia en la entrada y/o en el link DC del convertidor. El inductor en el link DC tiene la ventaja de no introducir caída de tensión, pero, dependiendo de la combinación de su valor con los valores de impedancia de la red y capacitancia del link DC, puede resultar en resonancias indeseadas con el sistema.

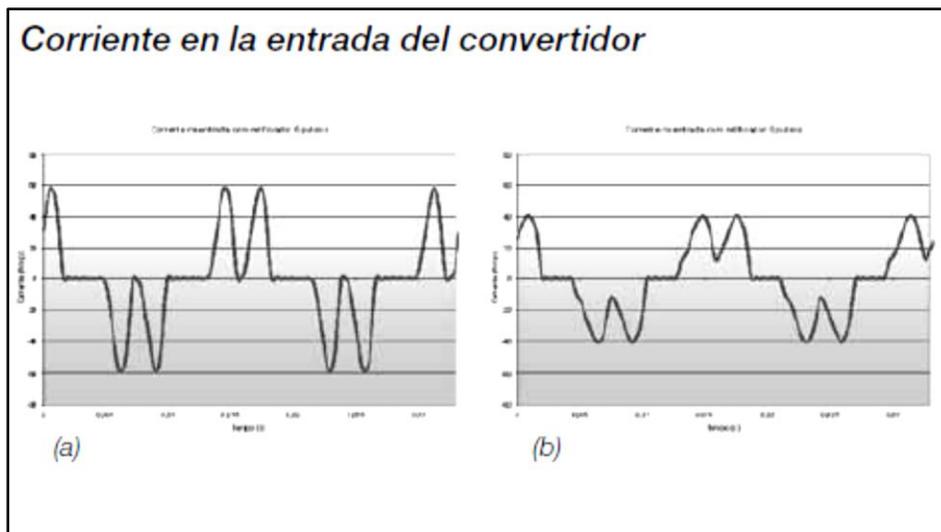
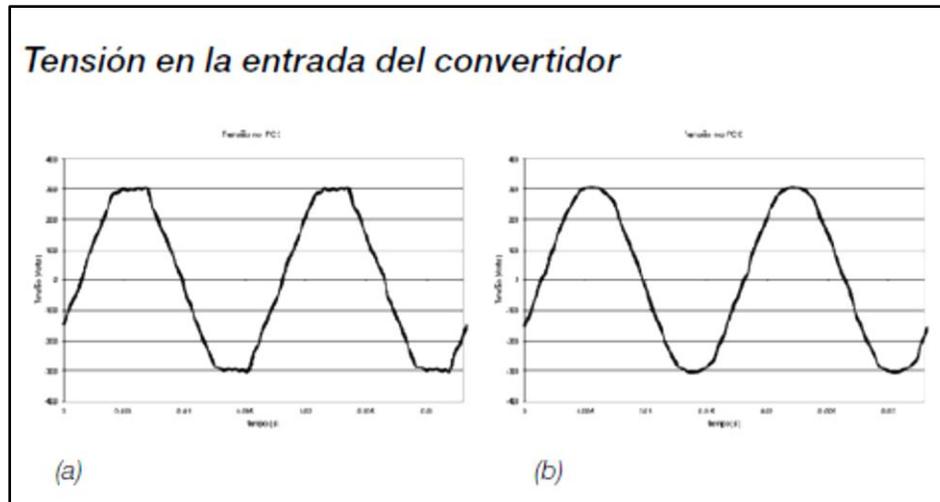


Figura 21 Formas de onda de corriente.



**Figura 22 Formas de onda de tensión.**

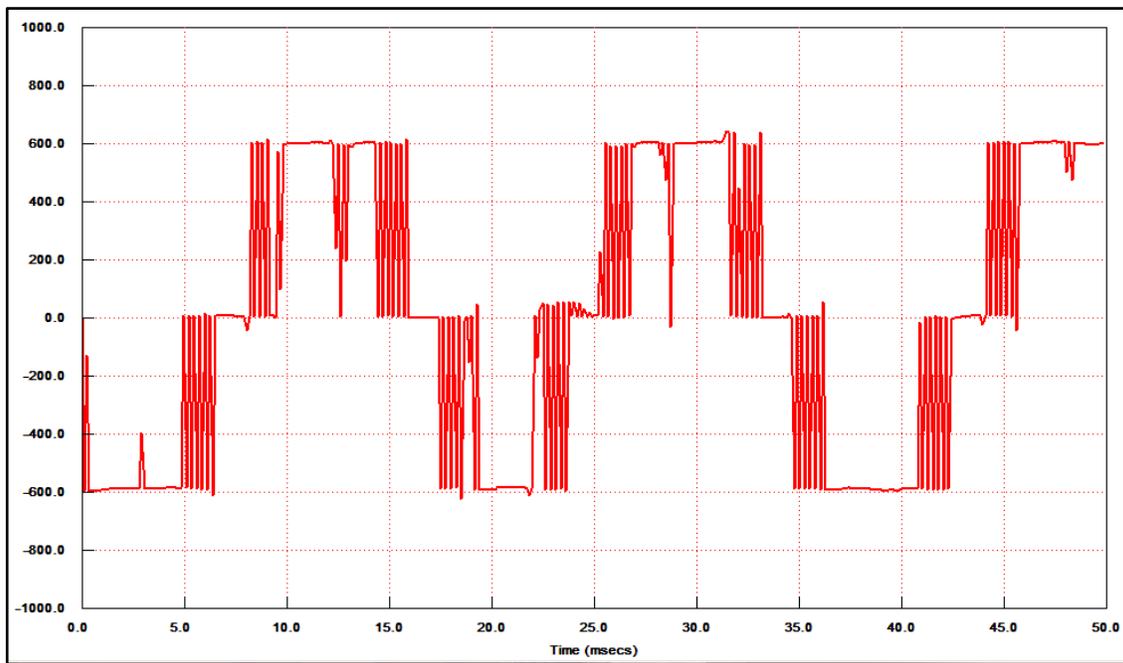
La reactancia de red, por otro lado, disminuye la tensión media del circuito de acoplamiento (comparada a aquella obtenida sin reactancia), pero es más eficaz en la reducción de eventuales transientes de sobretensión de la red, además de reducir la corriente eficaz en los diodos del rectificador y el triple de corriente en los capacitores del circuito intermediario, aumentando la vida útil de los semiconductores y del banco de capacitores constituyentes del link DC. Formas de onda de tensión y corriente en la entrada del convertidor sin (a) y con (b) reactancia de red. Se puede verificar que, la reactancia de red suaviza los picos (reduce, por tanto, el contenido armónico) y disminuye el valor eficaz da corriente en la entrada, causando también disminución de la distorsión de la tensión en la entrada del convertidor.

Para evitar danos al convertidor debe tener una impedancia mínima de red que proporcione una caída de tensión porcentual de 1 a 2%, dependiendo del tamaño del convertidor de frecuencia, para la corriente nominal del convertidor. Como criterio de uso considere una reactancia de red que presente una caída de tensión porcentual de 2 a 4% (para la corriente nominal del convertidor de frecuencia) da como buen resultado la caída de tensión en el motor, mejora el factor de potencia y la reducción de la distorsión armónica de la corriente. El valor de la reactancia de red necesaria para que se obtenga la caída de tensión porcentual deseada puede ser calculado de la siguiente manera:

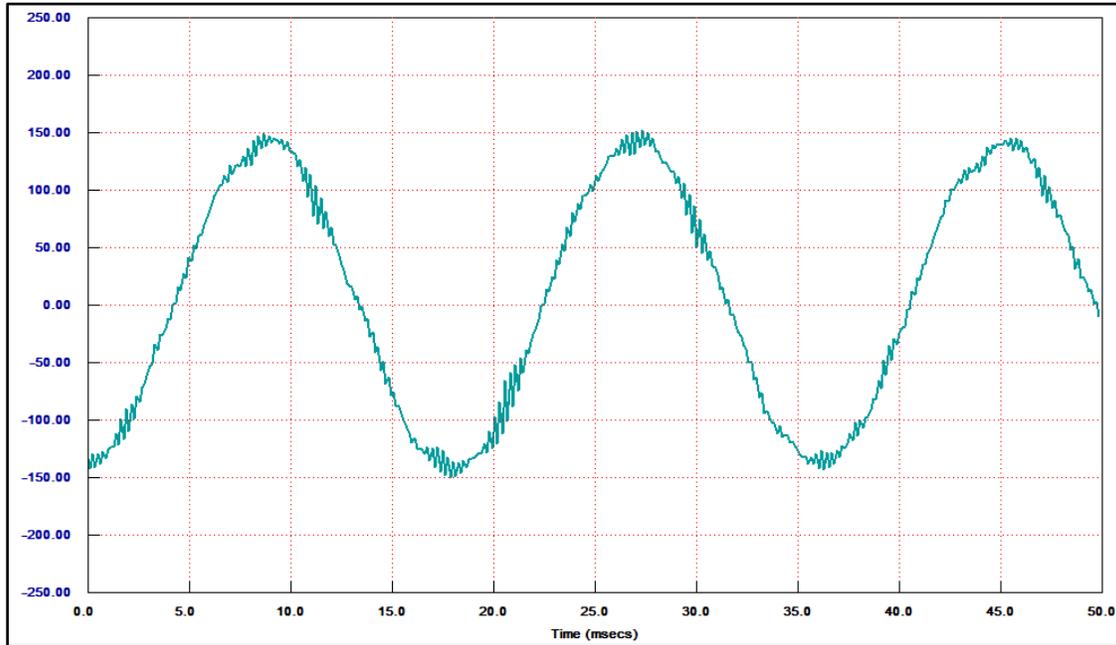
$$L = \frac{(CAIDA DE TENSION)\% * V_{red}}{\sqrt{3} * 2\pi * f_{red} * I_{nominal}} \quad (H) \quad (43)$$

#### 19.4 ARMONICAS QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DE INDUCCION.

El motor de inducción sometido a una tensión PWM, proveniente de un convertidor de frecuencia, estará sujeto a tensiones armónicas (componentes de frecuencia arriba de la frecuencia fundamental). Dependiendo de la modulación PWM empleada, de la frecuencia de conmutación y de otras particularidades del control, el motor podrá presentar incremento de pérdidas y temperatura, incremento de los niveles de vibración, ruido y perdidas de eficiencia. Las figuras 23 y 24 ilustran las formas de onda de tensión y corriente en los terminales del motor, cuando se provee una alimentación PWM.



*Figura 23 Forma de tensión de salida de variador de velocidad.*



*Figura 24 Forma de corriente de salida de variador de velocidad.*

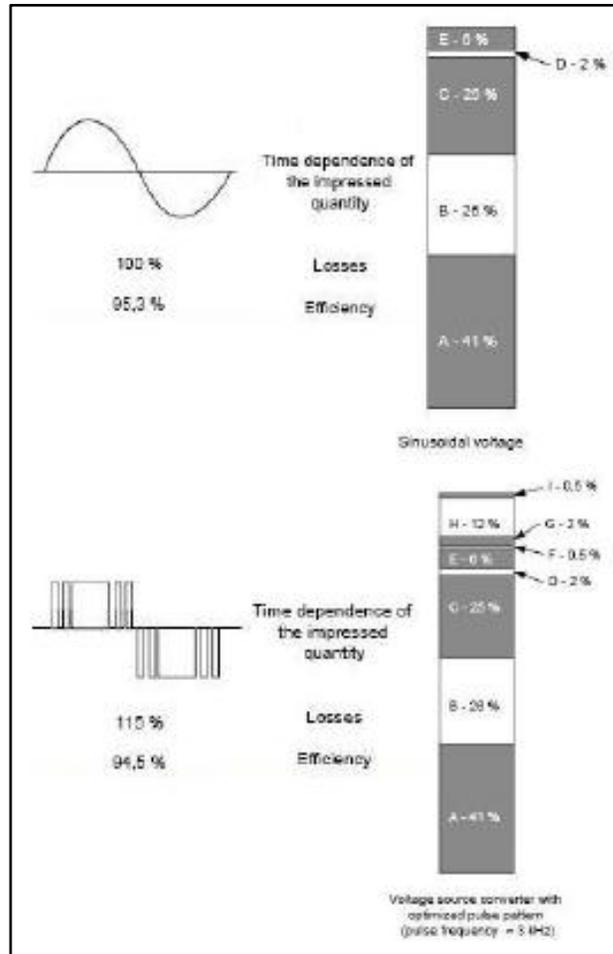
Se verifica que el motor observa en sus bornes de conexión una tensión pulsante (PWM) y una corriente prácticamente senoidal. Para reducir las armónicas generadas por un convertidor de frecuencia PWM, existen las siguientes soluciones:

Método de reducción de armónicas	Características de la solución.
Instalación de filtros pasivos de salida (L, LC senoidal, dV/dt)	Aumento del costo de instalación.
	Restricción para operaciones en los modos vectoriales.
	Caída de tensión (reducción de la potencia del motor).
Utilización de inversores con más niveles.	Aumento del costo.
	Reducción de confiabilidad del convertidor.
	Aumento de la complejidad del control.
Mejora de la calidad de la modulación PWM (mejora estándar de pulsos)	Modulación vectorial.
	No aumenta costos.
	Mejoría en el control de tensión.
Aumento de la frecuencia conmutación	Mayor eficiencia del bloque motor y variador.
	Reducción de la eficiencia del convertidor (aumento de las pérdidas de conmutación).
	Aumento de las corrientes de fuga hacia tierra.

*Tabla 4 Soluciones para reducción de armónicas.*

## 19.5 PERDIDAS GENERADAS POR EFECTO DE ARMÓNICOS A LA SALIDA DEL VARIADOR DE VELOCIDAD.

La IEC 60034-17 ejemplifica el aumento de las pérdidas en el motor debido al uso de convertidor de frecuencias con un caso práctico de un motor de carcasa 315, con valores nominales de par y velocidad:



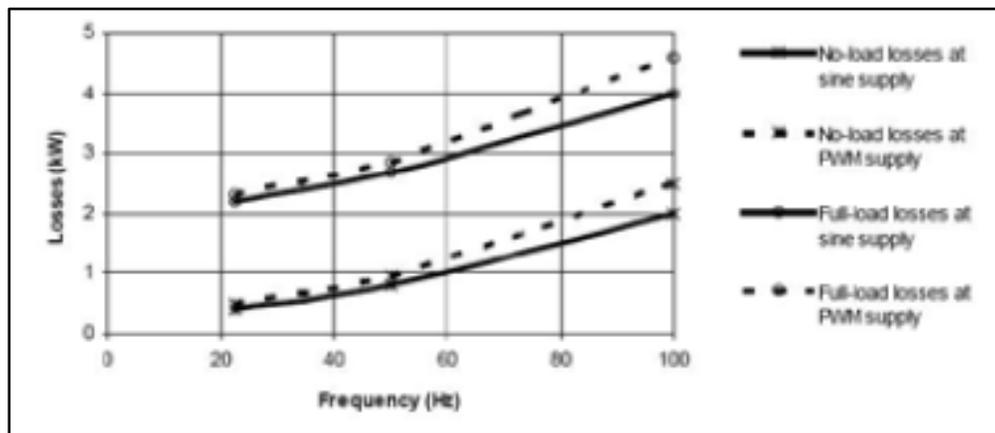
*Figura 25 Forma de tensión de salida de variador de velocidad.*

De la figura 25 podemos desglosar las pérdidas debido a una señal puramente senoidal y una señal PWM, se observan las pérdidas generadas por una señal PWM que introduce el variador.

Perdidas debido a la frecuencia fundamental	Pérdidas causadas por las armónicas.
A-Perdidas joule en el estator.	F-Perdidas joule en el estator.
B-Perdidas joule en el rotor.	G-Perdidas joule en el rotor.
C-Perdidas en el hierro.	H-Perdidas en el hierro.
D-Perdidas suplementarias.	I-Perdidas suplementarias.
E-Perdidas por conmutación.	J-Perdidas por conmutación.

*Tabla 5 Perdidas en motores de inducción.*

La IEC 60034-25 ilustra el aumento de las pérdidas del motor debido a la alimentación PWM con la figura 26:



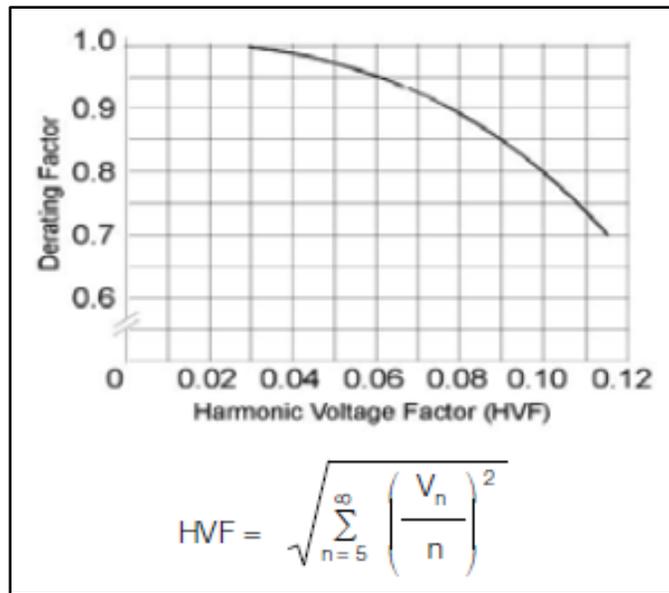
*Figura 26 Aumento de pérdidas alimentado por generación PWM.*

La NEMA MG1 - Parte 30 considera una reducción porcentual de par para evitar el sobrecalentamiento excesivo de un motor normal alimentado por convertidor, que estará sujeto a corrientes armónicas recurrentes del contenido armónico de la tensión PWM.

Donde:

n: orden de la armónica impar, no incluyendo las divisibles por 3.

V<sub>n</sub>: amplitud de la n-esima armónica de tensión (por unidad).



*Figura 27 Reduccion porcentual HVF.*

## 20 CONSIDERACIONES SOBRE LA EFICIENCIA DEL BLOQUE MOTOR Y CONVERTIDOR.

No hay procedimiento estandarizado para evaluar la eficiencia del bloque implementado entre el variador de velocidad y el motor de inducción, mas, sin embargo se pueden enumerar ciertas consideraciones prácticas que son resultado de mediciones realizadas al bloque antes mencionado:

- ❖ El motor de inducción, cuando es alimentado por un convertidor de frecuencia PWM, tiene su eficiencia disminuida, en relación a un motor alimentado por tensión puramente sinodal, debido al aumento en las perdidas ocasionado por las armónicas.
- ❖ En aplicaciones de motores de inducción tipo jaula de ardilla con convertidores de frecuencia debe evaluarse la eficiencia del sistema (conjunto convertidor + motor) y no solamente del motor.
- ❖ Cada caso debe ser analizado. Se debe considerar las características del convertidor y del motor, tales como: frecuencia de operación, frecuencia de conmutación, condición de carga y potencia del motor, tasa de distorsión armónica del convertidor.
- ❖ La instrumentación utilizada en las mediciones es de extrema importancia. Deben ser utilizados instrumentos que puedan medir el valor eficaz verdadero (true

RMS), de modo que sea posible la lectura de los valores correctos de potencia absorbida en la entrada y en la salida del convertidor.

- ❖ El aumento de la frecuencia de conmutación disminuye la eficiencia del convertidor y aumenta la eficiencia del motor.
- ❖ Motores de alta eficiencia alimentados por convertidores de frecuencia mantienen su eficiencia superior, en comparación con motores estándar alimentados por convertidores.

## 21 EVALUACIÓN NORMATIVA EN CUANTO A LA EFICIENCIA DE MOTORES ALIMENTADOS POR VARIADORES.

NEMA MG1 Parte 30 - La eficiencia del motor caerá, cuando es operado en un control. Los armónicos presentes elevarán las pérdidas eléctricas, que reducirán la eficiencia y causarán aumento también de la temperatura del motor, reduciendo aún más la eficiencia del motor.

NEMA MG1 Parte 31 - Pruebas de desempeño, cuando sean solicitadas, deberán ser realizadas con tensión sinodal. Pero, el motor alimentado por convertidor de frecuencia podrá ser probado, desde que haya un acuerdo mutuo entre el fabricante y el usuario.

NEMA Aplicación Guide for AC ASD Systems - La eficiencia global del sistema está basado en las pérdidas totales del motor, del control y de cualquier equipamiento auxiliar. El uso de convertidores frecuentemente aumenta la eficiencia del sistema, comparado con los métodos tradicionales de variación de velocidad (como engranajes y correas) y de ajuste de carga (como válvulas y amortiguadores).

IEC 60034-17 - Las características de desempeño de las aplicaciones con motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia son influenciadas por todo el sistema, comprendiendo la fuente de alimentación, el convertidor, el motor, la carga mecánica y el equipamiento de control. Debido a la complejidad de las interacciones técnicas entre el sistema y las diversas condiciones de operación, está afuera del alcance de la especificación técnica, la cuantificación de valores numéricos relacionados con tales aplicaciones. No hay método sencillo para calcular las pérdidas adicionales y no se puede hacer cualquier afirmación genérica respecto a su valor.

IEC 60034-25 - Los métodos recomendados para la determinación de la eficiencia del motor están dados en la IEC 60034-2 (método de separación de pérdidas para motores > 150 kW y medición de entrada-salida para motores ≤ 150 kW). Las pérdidas en

vacío (incluyendo las pérdidas suplementares) deben ser medidas si posible con el mismo método de modulación y frecuencia de conmutación que el convertidor producirá con plena carga. La determinación de la eficiencia global del sistema (motor + convertidor) por medición entrada-salida es también aplicable, bajo acuerdo entre fabricante y usuario. En este caso, la eficiencia del motor no podrá ser determinado separadamente.

## 22 INFLUENCIA DEL VARIADOR DE VELOCIDAD EN LA TEMPERATURA DEL MOTOR.

Motores de inducción pueden presentar una temperatura más elevada cuando son alimentados por convertidores que cuando son alimentados con tensión senoidal. Esta sobreelevación de temperatura es producto del incremento de las pérdidas del motor, en función de las componentes de alta frecuencia de la señal PWM, sumada a la pobre disipación de calor, recurrente de la variación de velocidad.

Las distorsiones armónicas de la forma de onda de tensión del motor alimentado por variador de velocidad contribuyen al incremento de las pérdidas, una vez que crean en el acero magnético lazos menores de histéresis, aumentando la saturación efectiva del núcleo, además de generar corrientes armónicas de alta frecuencia, que provocan un aumento de las pérdidas Joule en los conductores.

Estas componentes de alta frecuencia no contribuyen para la producción del par en el motor, una vez que no se aumenta el flujo en el entrehierro, que gira en la velocidad sincrónica. La operación del motor a bajas revoluciones provoca reducción en la ventilación y consecuentemente la pérdida del enfriamiento (en motores autoventilados) causando también la elevación de temperatura. Básicamente hay las siguientes soluciones para evitar el sobrecalentamiento del motor:

- ❖ Reducción del par nominal (sobredimensionamiento del motor).
- ❖ Utilización de sistema de ventilación independiente.

## 23 CARACTERISTICAS DE DISEÑO PARA MOTORES OPERADOS POR VARIADORES DE VELOCIDAD

### 23.1 MOTOR, CONSIDERACIONES ELÉCTRICAS.

#### 23.1.1 OPERACIONES ESTÁNDAR EN 60 HZ (50 HZ)

Un error común en la selección de equipos como los variadores de velocidad es, que dentro de sus requerimientos se busque que los motores sean capaces de operar arriba de 50 o 60 Hz, ya que en la mayoría de los casos, el variador de velocidad no puede cumplir esas exigencias. Esta operación requiere que el motor sea capaz de acelerar la carga a velocidades de 50 Hz o a 60 Hz cuando el voltaje nominal es aplicado. Diseñar un motor para cruzar esta línea impone ciertas consideraciones que afectan la eficiencia del conjunto de un sistema de frecuencia variable. El par inducido es proporcional a la resistencia del rotor tipo jaula de ardilla, entonces las consideraciones necesarias para proveer suficiente torque para acelerar cargas, en un margen de tiempo con las limitaciones térmicas del motor, nos lleva a la necesidad de proveer una alta resistencia en el rotor. Una alta resistencia en el rotor del motor causa mayor deslizamiento y pérdidas cuando el motor está operando a una velocidad determinada.

Exceptuando ciertas circunstancias, este requerimiento debe de ser descartado. En Muchas plantas donde se operan varios sistemas pequeños de manejo en servicio, el modo de operación ha sido aceptable, sin la necesidad de este tipo de requerimiento debido a que no es muy común manejar cargas que demanden un par inducido bastante alto. Los motores de DC de capacidades considerables constituyen una aplicación critica para un tipo de condición de carga requerida y se acepta el hecho que cuando se maneja en una operación muy baja es como si el motor estuviera apagado. Los sistemas de frecuencia variable deberían de tener la misma consideración.

#### 23.1.2 EL ROTOR.

Los rotores son hechos normalmente con unas barras rectangulares dispuestas entre ranuras labradas en la cara del rotor. En ocasiones se disponen de barras dobles en el rotor para algún tipo de aplicación especial. Siempre hay un equilibrio entre el tamaño de la barra para las capacidades térmicas y la eficiencia, la resistencia de la barra para desarrollar torques iniciales, y la medida del laminado del acero del rotor para una baja densidad de flujo. Por medio del manejo del inversor eliminamos la

necesidad de una alta resistencia en el rotor ya que se desea que la resistencia sea lo más baja posible para minimizar las pérdidas  $I^2R$  del rotor.

Esto requiere que las barras sean lo más largas posibles y que los anillos cortocircuitados estén constituidos de materiales con una alta conductividad. Las dimensiones de la barra están limitadas por la necesidad de minimizar la densidad de flujo en las uniones de las láminas de acero y por el aumento de la pérdida de flujo (flujo disperso) a medida que la profundidad de barra aumenta. La pérdida de flujo (flujo disperso) extra en las barras con mayor profundidad es de hecho útil para reducir las corrientes armónicas y calor en los equipos.

Para unidades CSI el número de ranuras en el estator y rotor debería de ser maximizado para minimizar la reactancia de dispersión. La resistencia física está relacionada con el ancho de cada lamina para la fuerza mecánica - 3/16 in (5 mm) es una medida genérica - y la densidad de flujo tiene que ser respetada. En los motores de menor capacidad no es necesario considerar el hecho de poder modificar las capacidades en cuanto a la resistencia del rotor, caso contrario en los motores de gran capacidad, es una buena práctica considerar estas modificaciones para efectos de los distintos tipos de carga a los que estará sometido.

Los rotores de última generación deberían de ser sin ranuras con un conductor cilíndrico de hierro. Con un número mayor de ranuras el entre-hierro, puede ser recortado sin aumentar la pérdida de vibraciones de ranura. La densidad de flujo para una densidad de corriente también aumenta con una reducción efectiva a lo largo del entre-hierro.

Cuando se saturan porciones del circuito magnético, se incrementa la fuerza magneto-motriz (MMF) requerida para mantener un cierto nivel de flujo alrededor del circuito magnético. Ya que el flujo en el entre-hierro es el que suministra la potencia de salida al motor, bajo condiciones de saturación las corrientes en el devanado tienden a incrementarse para mantener el flujo en el entre-hierro, por ende las pérdidas aumentan. Los fabricantes de motores están constantemente balanceando la necesidad de más cobre o aluminio y más acero para minimizar pérdidas.

### 23.1.3 ESTADORES.

Las corrientes armónicas de un variador de frecuencia causan un incremento en las pérdidas por calentamiento, reflejadas en la relación  $I^2R$  así como se incrementan las

pérdidas en el hierro del estator. Las altas frecuencias en las corrientes armónicas causan mayor efecto corona en los conductores del estator, de ahí que, el calentamiento es proporcionalmente mayor. El efecto corona puede ser disminuido utilizando más conductores con un área mucho menor. Esto, por supuesto, es más costoso y causa que el radio del aislamiento del cobre en la ranura disminuya, entonces las ganancias deberían de ser equilibradas con las pérdidas. Las pérdidas en el hierro pueden ser disminuidas usando un mejor acero y láminas más finas. El costo y las restricciones mecánicas limitan lo que se puede hacer. El 'switchero' o conmutación de los tiristores puede causar picos de voltaje mayores que los normales. El aislante de las bobinas del estator, especialmente en el aislante de cada vuelta, se debe tomar en consideración en motores designados para usarse en fuentes de frecuencia variable.

#### 23.1.4 SELECCIÓN DEL NUMERO DE POLOS

En el pasado el número de polos en una maquina eran definidos por la velocidad de salida requerida y la selección de velocidad era muy limitada. Con los variadores de frecuencia, la selección del número de polos no esta tan limitada.

Históricamente, las máquinas de dos polos han tenido problemas inherentes que han sido reconocidos, pero cuando una velocidad de rotación mayor a 1800 rpm (1500 rpm en 50 Hz) es requerida, no hay otra opción. La máxima apertura de un polo en una máquina de dos polos es  $180^\circ$ . Esto lo hace casi imposible de poner devanados en las ranuras de los estatores, a menos que se usen devanados a la mitad que son asociados con problemas en su uso. En la práctica, la mayoría de máquinas de dos polos están ligadas a una apertura parcial de  $100-110^\circ$ , y las perdidas en el factor devanado son aceptadas.

La profundidad requerida para una ranura de un rotor y el yugo de un rotor en una maquina Premium de dos polos, se toma como regla general  $0.2T_p$ , para un mayor espacio se puede dar  $0.6T_p$  para una apertura de polos más pequeña de rotores de hierro. Ya que los radios de los rotores  $\gamma$  equivalen a  $PT_p/2\pi$ , esta es  $0.32T_p$  para una máquina de dos polos,  $0.64T_p$  para una máquina de 4 polos y  $0.95T_p$  para una máquina de 6 polos. Se puede ver que cuando el radio del eje es reducido, estos requerimientos del hierro son difíciles de cumplir en una máquina de dos polos. La respuesta es una alta densidad de flujo y un eje pequeño, que significa una máquina de eje flexible.

Cuando se considera un motor para operar bajo velocidad ajustable, se considera una máquina de 4 o 6 polos, incluso cuando necesitamos 3,600 rpm o más. No hay

problemas mecánicos inherentes que hagan que una máquina de cuatro o seis polos sea inadecuada para el funcionamiento a 3,600 rpm. Para el mismo tamaño de rotor y HP, hay más espacio para el eje, una máquina de eje rígido puede ser fabricada en tamaños mucho más grandes. Esto elimina la posibilidad de operar a velocidad crítica. También permite al fabricante usar la apertura completa o una apertura parcial eficiente para los devanados del estator.

Existen ventajas y desventajas. Para usar una máquina de cuatro polos a 3,600 rpm se requiere que la frecuencia sea de 120 Hz. Los devanados del estator presentan pérdidas por 'corrientes de Eddy' que son proporcionales al cuadrado de la frecuencia, entonces estas pérdidas se incrementan. El uso de conductores pequeños individuales y la transposición Roebel de los conductores disminuye estas pérdidas, pero agrega costos de manufactura. Hay también pérdidas adicionales en el hierro por la alta frecuencia. Los laminados deben de ser fabricados con un mejor acero y lo más delgados posibles para combatir esto. Esto está equilibrado entre la reducción de pérdidas con una mayor eficiencia de apertura del devanado del polo y menor saturación del hierro.

#### 23.1.5 VENTILACION Y RUIDO.

Los ventiladores se implementan para el adecuado enfriamiento del motor a la velocidad nominal. Con el variador de frecuencia probablemente se usara el motor a velocidades por encima y por debajo de la velocidad nominal de 60 Hz. Además, hay pérdidas adicionales por corrientes armónicas, generando calentamiento, que tiene que ser eliminado. Los fabricantes podrían diseñar ventiladores para disipar el calor a baja velocidad. Por desgracia, a alta velocidad serían consumidores de energía y ruidosos. También es posible diseñar motores lo suficientemente grandes como para sobrevivir a un enfriamiento inadecuado. Esto es caro. En la mayoría de los casos la respuesta es un ventilador externo para proporcionar las condiciones de enfriamiento ideales. Se puede girar a baja velocidad, sólo si es requerido. Al considerar las limitaciones de ruido en un motor que opera bajo variadores de frecuencia, hay que asegurarse de dejar espacio suficiente para el funcionamiento por encima la velocidad nominal (de 60 Hz) y ningún ventilador externo. Las corrientes armónicas también excitan ruido magnético adicional a frecuencias más altas.

## 23.2 CONSIDERACIONES MECANICAS.

### 23.2.1 DINAMICA LATERAL.

Históricamente, se han especificado los motores para ser seguros en velocidades críticas que han sido eliminadas de las velocidades de operación para evitar amplificaciones armónicas de vibraciones inducidas por el desbalance. Muchas de las especificaciones deseadas necesitan que la maquina fuese de “eje rígido” o primera velocidad critica de 120 a 125 por ciento por encima de la velocidad de operación. Así como las grandes máquinas de alta velocidad son usadas, por esa razón nuestra discusión sobre las máquinas de dos polos, se encontró que la única opción eran máquinas de “ejes flexibles”. Lo primero, era crítico operar debajo de la velocidad de operación.

Ahora con los VFD se dispone de la capacidad de variar la velocidad de operación por encima del rango. Las opciones son limitadas. Se Puede tomar la opción de la fuerza bruta y decir que no se requieren velocidades críticas en el rango de operación, pero esto sería impráctico para motores más grandes. Se Puede controlar la acción de ordenar los puntos muertos en el rango de operación donde el sistema no está estático pero puede pasar a través del mismo. Esto complica los controles y puede imponer limitaciones en el proceso de operación. Se puede balancear el rotor de una manera tan fina, que cuando está operando a una velocidad crítica, la amortiguación es suficiente para limitar las vibraciones a niveles aceptables. Esto por supuesto son las alternativas más aceptables y han probado ser factibles en algunas aplicaciones.

### 23.2.2 CONSTRUCCION DEL ROTOR.

Desde un punto de vista de un diseñador eléctrico el rotor ideal sería corto y tener un diámetro grande. Esto daría una gran cantidad de espacio al diseñador para el estator, las ranuras del rotor, yugos y eje. Él rotor sería capaz de mantener tanto la corriente y la densidad de flujo con valores pequeños para la eficiencia. Él tendría que equilibrar esto un tanto en contra de la longitud de vueltas finales; el más largo es el rotor, menos porcentaje de pérdidas de vueltas finales, pero las ventajas serían considerables.

Por desgracia, el ingeniero mecánico, así como las consideraciones económicas, también deben de satisfacerse. El ingeniero mecánico especifica el diseño en cuanto a un rotor corto, un gran eje para hacer una máquina ‘rígida’, pero un mayor diámetro tiende a dar problemas. La fuerza centrífuga en una barra de rotor aumenta en

proporción directa a su distancia desde el centro del eje y el cuadrado de su velocidad alrededor del eje.

La frecuencia ajustable añade una nueva dimensión a los problemas del diseñador del motor. Ya no es la máquina de cuatro polos limitado a 1,500 o 1,800 rpm. Peor aún, algunas personas esperan que una máquina de dos polos pueda girar a 7,000 rpm. Estos problemas son únicos para el diseñador del motor, pero las personas que diseñan los grandes generadores se han enfrentado a las fuerzas centrífugas similares, si no velocidades similares, durante años.

Su respuesta ante esa necesidad es que el rotor de la máquina, eje, yugo, y las ranuras salientes de una pieza solida de acero para hacerla más fuerte. También utilizan un cilindro de acero inoxidable no magnético, ajuste reducido alrededor de los anillos cortocircuitados y los extremos de las barras del rotor para mantenerlo en su lugar. Las ranuras del rotor son ranuras cerradas para mantener las barras en su lugar. Cuidados similares están siendo tomados en cuenta en la fabricación de motores para uso de variadores de velocidad.

## 24 MOTORES ESPECIALES CLASIFICADOS COMO 'INVERTER DUTY' ALIMENTADOS POR VARIADORES DE VELOCIDAD

Componente electrónico de velocidad ajustable ó variable, conocidos como unidades de frecuencia variable (VFD ó VSD), que se comercializan para ser utilizados como "utilizable con cualquier motor estándar". Sin embargo, las fallas prematuras de los sistemas de aislamiento en los motores ocurren a causa de la rápida conmutación, la modulación por ancho de pulso (PWM) se introdujo con los VFD. Estos picos de tensión pueden dañar rápidamente el sistema de aislamiento de un motor, resultando en una falla prematura del motor.

### 24.1 EFECTOS DE LOS VARIADORES DE VELOCIDAD EN MOTORES DE INDUCCIÓN

La frecuencia de salida, variable no sinusoidal, de accionamiento PWM tiene varios efectos, entre ellos el aumento de las pérdidas del motor, ventilación inadecuada a velocidades bajas, mayores esfuerzos dieléctricos en los bobinados del motor, el ruido magnético y corrientes del eje. Estos efectos se pueden combinar para dañar el aislamiento de un motor y acortar severamente la vida útil de funcionamiento.

Las altas tasas de conmutación de los semiconductores de potencia modernos conducen a cambios rápidos en la tensión en cortos periodos de tiempo, ( $dV/dt$ ,

medidos en unidades de voltios por microsegundo). Formas de onda de frente escarpado con grandes  $dV/dt$  o tiempos de subida muy rápidos conducen al incremento de tensión y otros problemas de suministro de energía.

Cuando la impedancia del motor es mucho mayor que la impedancia del cable conductor entre el motor y la unidad de frecuencia variable, la forma de onda de tensión se refleja en los terminales del motor. Esto crea una onda estacionaria. Cables de motor más largos favorecen a una mayor amplitud de ondas estacionarias. Los picos de voltaje ocurren con valores máximos de hasta 2.150 voltios (V) en un sistema de 480 V con 10% de sobretensión. Estos picos pueden conducir a la rotura del aislamiento, lo que resulta en cortocircuitos de fase a fase o de espira a espira, y posteriormente sobre-corrientes del dispositivo.

Se pueden tomar medidas preventivas para evitar las fallas del motor causadas por picos de voltaje. Estas incluyen el uso de equipos de acondicionamiento de energía (como los filtros  $dV/dt$  o cargas reactivas) y la restricción de la distancia del cable entre el variador y el motor. Algunos variadores son instalados en motores sobre dimensionados o uso de alta temperatura de la resistencia de aislamiento, aislamiento clase H.

#### 24.2 DISEÑOS DE MOTOR 'INVERTER DUTY'

La mayoría de los fabricantes ofrecen motores de uso general ó propósito general, motores trifásicos de eficiencia Premium que cuentan con características de aislamiento "inverter-friendly". Estos motores "inverter-ready" son adecuados para uso con cargas de torque variable con un amplio rango de velocidades.

Por el contrario, los motores "inverter-duty" son bobinados con sistemas de aislamiento a los picos tensión.

Algunos inversores utilizan cables con un grado de magnetización para minimizar los efectos adversos de las formas de onda producidas por los VFD. Otros diseños están enrollados con bobinas adyacentes que están separadas para minimizar el potencial de tensión. Sistemas de aislamiento mejorados permiten reducir la degradación de los motores que se someten a picos de voltaje transitorios. Un espesor mayor o acumulación de barniz Premium (a través de múltiples capas y horneado) minimiza el potencial de huecos internos, y un motor con un diseño de menor incremento calor aumenta la resistencia a esfuerzos por tensión. La calidad de fabricación afecta también al voltaje inicial de corona (CIV), el punto en el cual las descargas eléctricas parciales se producen debido a la ionización del aire alrededor

del conductor. El voltaje inicial de corona (CIV) es una medida de la capacidad de los devanados de un motor para soportar esfuerzos de tensión.

NEMA MG 1-2011, Parte 31, especifica que los sistemas de aislamiento para propósito definido, de bajo voltaje ( $\leq 600$  V) motores “inverter-duty” deben estar diseñados para soportar un límite superior de 3.1 veces de voltaje de línea a línea del motor. Esto es equivalente a un límite máximo de 1.426 voltios pico en los terminales del motor para un motor clasificado en 460 V. Tiempos de subida debe ser igual o superior al 0.1 microsegundo. Estos motores se pueden utilizar sin filtros adicionales o cargas reactivas siempre que la sobre tensión no supere el límite superior en los terminales del motor.

Motores de media tensión “inverter-duty” con una calificación base que supera los 600 V debe ser capaz de soportar una tensión pico igual a 2.04 veces la tensión nominal de línea a línea del motor. Tiempos de subida debe ser igual o superior a 1 microsegundo.

Motores “inverter-duty” también están diseñados para rangos más amplios de velocidad de torque constante que puede estar provisto de un motor de propósito general. Mientras que un motor de eficiencia premium totalmente cerrado (fan-cooled) de 10 HP puede ser capaz de poseer una relación 10: 1 en rango de velocidad de par constante, un motor “inverter-duty” es capaz de proporcionar par nominal completo a velocidad cero, así como operar más allá de su velocidad nominal. El uso de motores “inverter-duty” para cargas de par variable es una exageración, como “inverter-ready” para propósito general, estos son adecuados para el control VFD con cargas de par variable.

El sistema de aislamiento en un motor 208/230V es idéntico al de un motor 460V. Por lo tanto, los picos de tensión producidos por los inversores en sistemas 208 o 230V es improbable que causen daños en el aislamiento, en cualquier longitud de cable o soporte de la unidad de frecuencia.

Motores más grandes “inverter-duty” a menudo tienen un soplador auxiliar de velocidad constante para proporcionar una refrigeración adecuada para motores que operan a bajas velocidades. Arriba de un tamaño de chasis 500, los motores “inverter-duty” deben tener ambos rodamientos aislados y estar equipados con una escobilla de tierra al eje, con un conductor de puesta a tierra del motor al chasis del inversor.

### 24.3 DIRECTRICES PARA LA SELECCIÓN DE MOTOR

NEMA MG 1-2011, Parte 30, proporciona normas de funcionamiento de los motores de uso general utilizados con VFD. Cuando se opera en condiciones de servicio habituales, no hay reducción significativa en la vida de servicio si la tensión pico en los terminales del motor se limita a 1,000 V y los tiempos de subida son iguales y exceden a 2 microsegundos. Póngase en contacto con el fabricante del motor para obtener orientación sobre la compatibilidad del motor/ inversor cuando se espera que los picos de tensión supere 1,000 V o los tiempos de subida sean menores de 2 microsegundos. Un motor propósito definido, un motor "inverter-duty" y/o el filtro supresor de armónicos, carga reactiva, u otro equipo de acondicionamiento de tensión será requerido.

Motores "inverter-duty" son especificados cuando se opera a velocidades extremadamente bajas, sobre todo cuando se sirve una carga de par constante, o cuando se opera más allá de la velocidad base.

Cuando se requiere un motor "inverter-duty", asegúrese de que está diseñado y fabricado para cumplir con las especificaciones más actuales definidas por NEMA MG 1 Sección IV, "Performance Standards Applying to All Machines" Parte 31, "Definite-Purpose Inverter-Fed Polyphase Motors."

### 24.4 ACCIONES SUGERIDAS

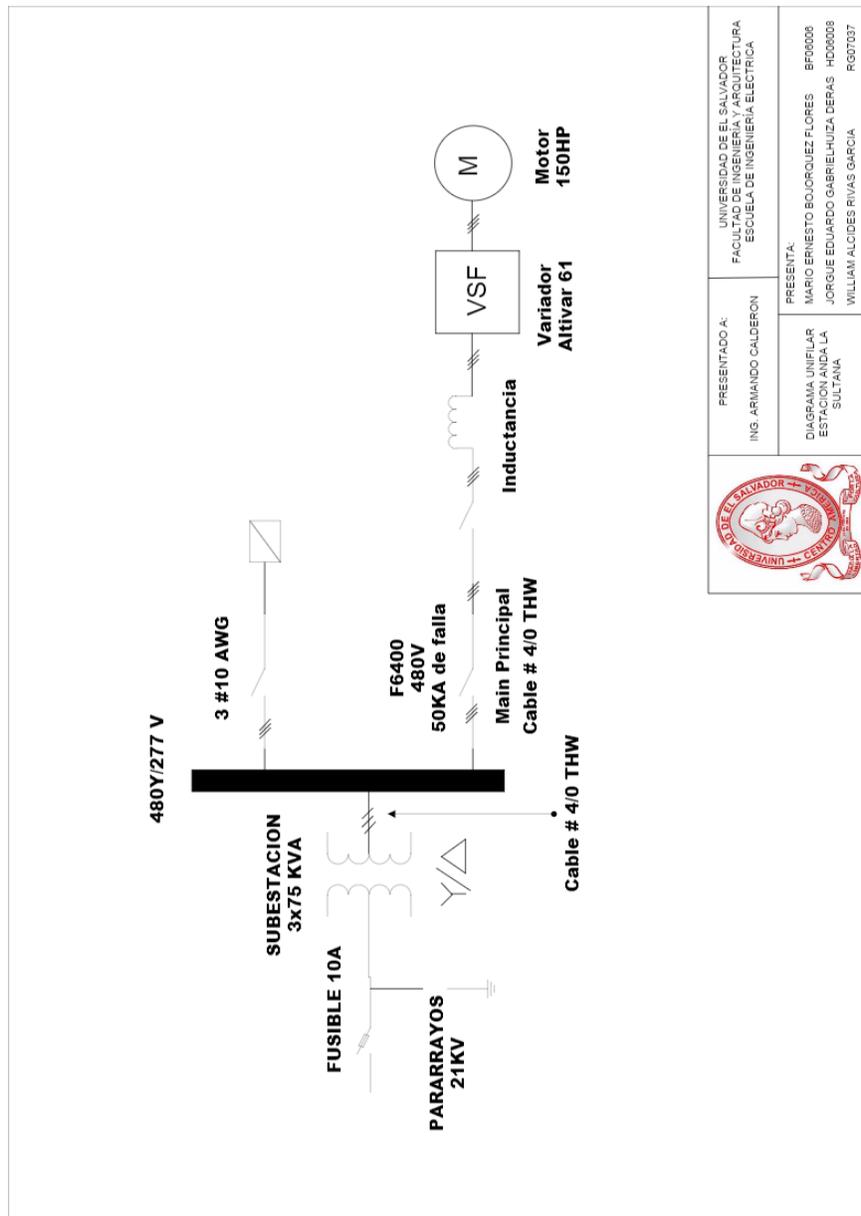
- 1) Obtener información de los fabricantes de motores, del inversor, tiempos de subida del inversor y los efectos de la longitud del cable. Utilice esta información para evaluar la capacidad de los motores existentes para soportar esfuerzos de tensión inducida por el inversor.
- 2) Daños por ondas reflejadas generalmente no son un problema cuando la distancia entre el motor y la unidad (inversor) está a menos de 15 pies.
- 3) La sobre tensión es más probable que ocurra con motores pequeños y accionamientos con tiempos de subida más rápidos.
- 4) El potencial de daño de las ondas reflejadas es especialmente alto cuando varios motores se operan desde un mismo VFD.

## 25 ESQUEMAS DE CONEXIÓN PARA SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA POTABLE.

Los esquemas de conexión implementados en la estación de bombeo de ANDA La Sultana se muestran a continuación.

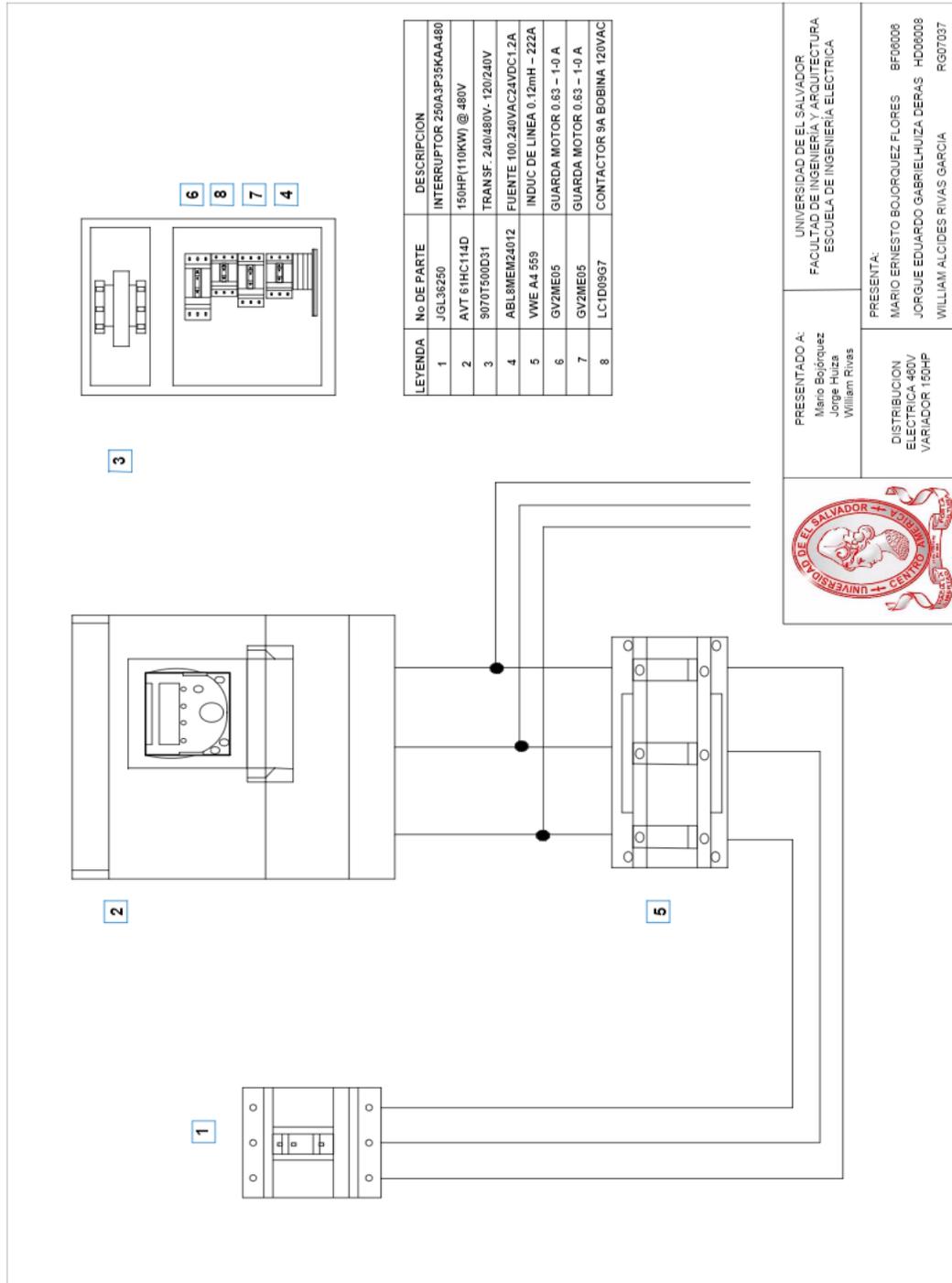
### 25.1 ESQUEMA UNIFILAR

- ❖ En este esquema se detallan aspectos como tensión de servicio, protecciones en alta tensión y baja tensión, tensión en el secundario, detalle de las protecciones, detalle del variador y la potencia del motor así como un sub-tablero de luces y tomas general.



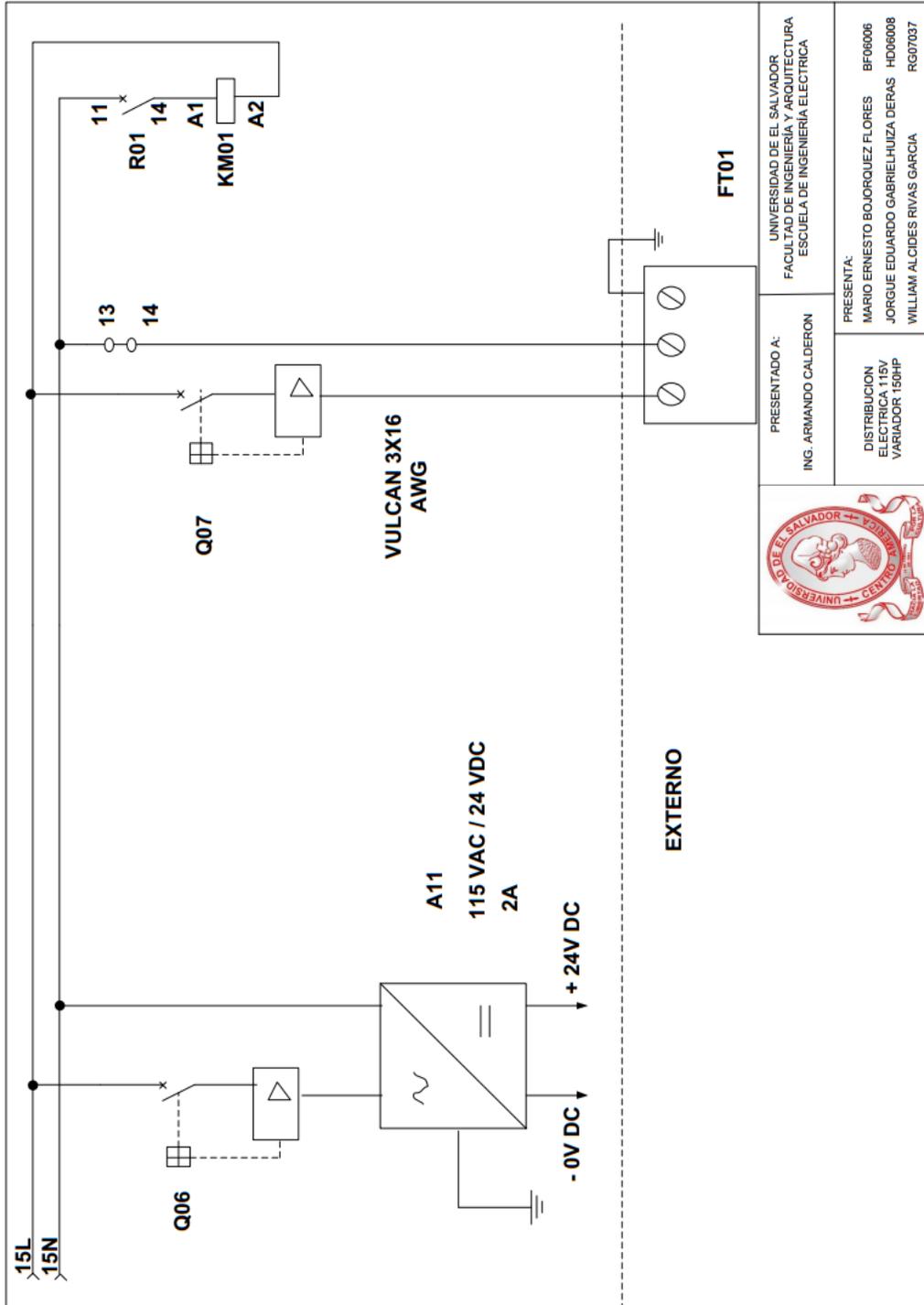
## 25.2 ESQUEMA CONEXIÓN DEL VARIADOR

- ❖ En el esquema siguiente se observa la disposición del variador junto con su protección termo-magnética, inductancia de red y la conexión de la parte lógica de control.



### 25.3 DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA A 115V.

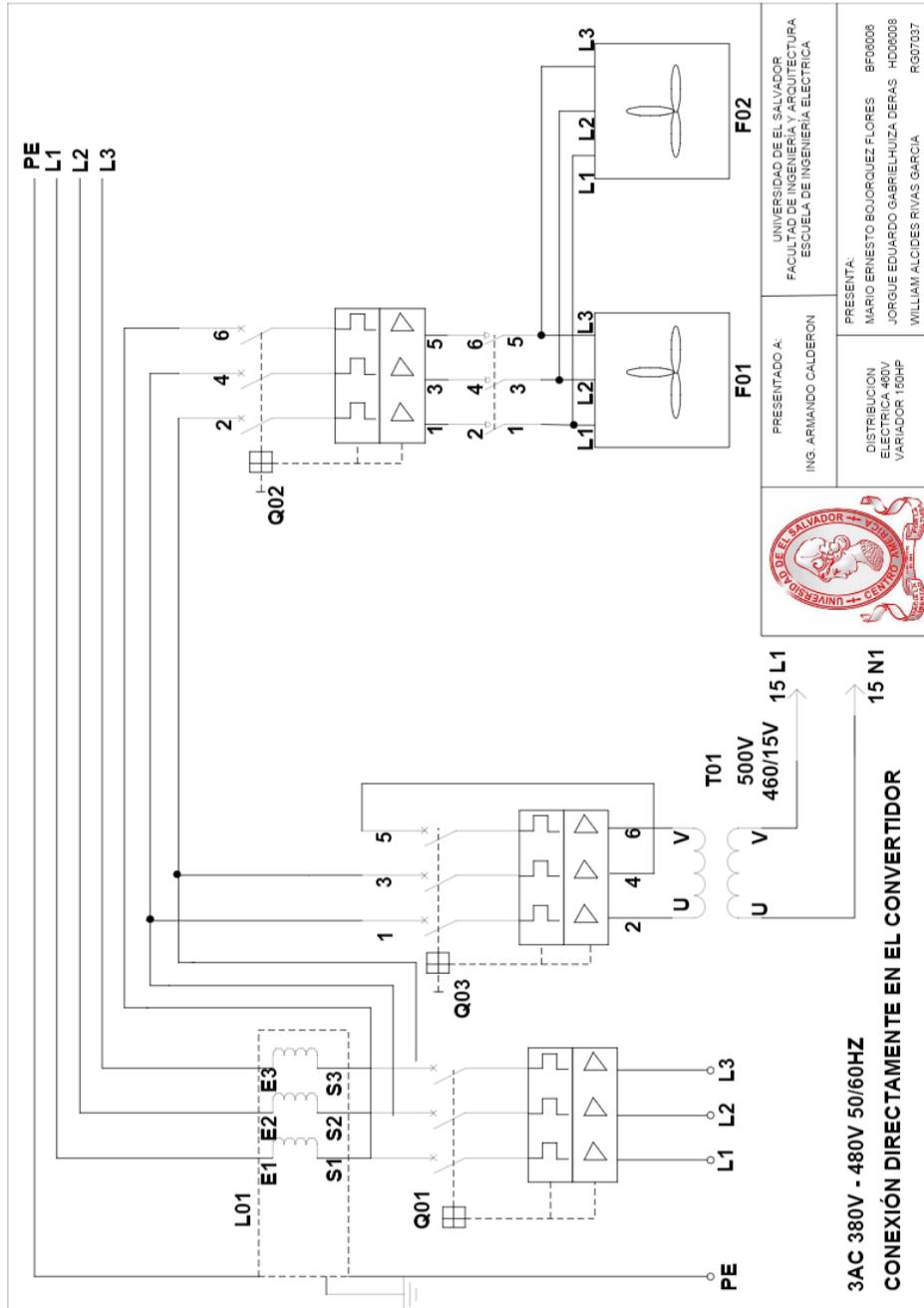
- ❖ En este esquema se muestra la parte eléctrica a 115VAC y suministro a 24VDC para la alimentación de los sensores de presión y de caudal.



	PRESENTADO A: ING. ARMANDO CALDERON	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
	PRESENTA: MARIO ERNESTO BOJORQUEZ FLORES BF06006 JORGUE EDUARDO GABRIELHUIZA DERRAS HD06008 WILLIAM ALCIDES RIVAS GARCIA RG07037	

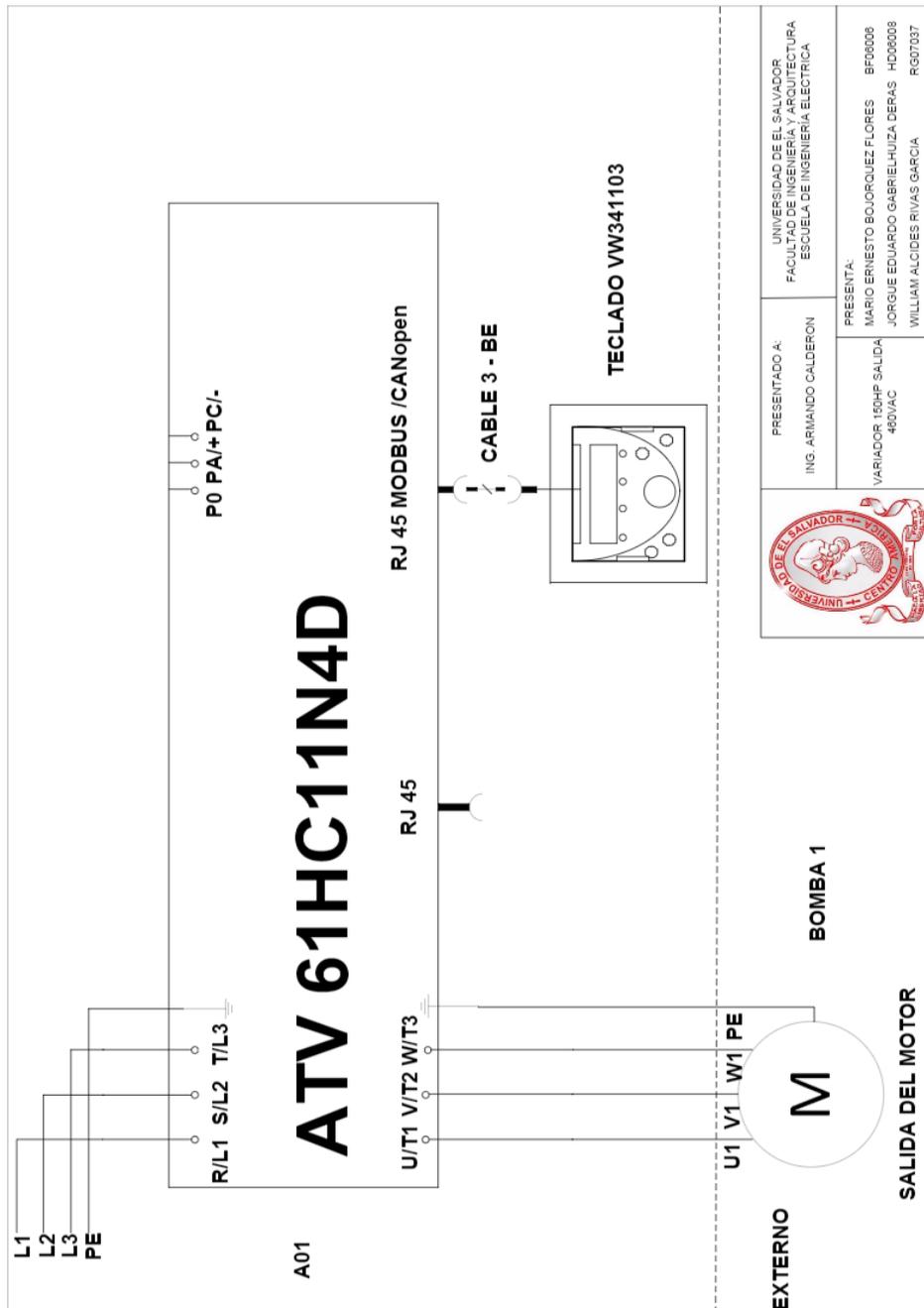
## 25.4 DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA A 480V

- ❖ En este esquema vemos la conexión a 480V proveniente de la protección principal de la subestación, se deriva en una inductancia de red L01 y se derivan tensiones para la parte lógica a 115V por medio de T01 para la parte de control así como para la ventilación del gabinete donde se ubica el variador.



## 25.5 SALIDA DEL VARIADOR A 480VAC

- ❖ En este esquema se presenta el modo de conexión para la alimentación del variador a 480V que serían L1, L2 Y L3 así como de las salidas al motor provenientes del variador que serían U, V Y W y la parte de control del variador por medio del mando a distancia.



	PRESENTADO A: ING. ARMANDO CALDERON	UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA
	PRESENTA: MARIO ERNESTO BOJORQUEZ FLORES    BF00006 JORQUE EDUARDO GABRIEL HUIZA BERRAS    HD06008 WILLIAM ALCIDES RIVAS GARCIA            RG07037	

26 ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS IMPLEMENTADOS EN ESTACIONES DE BOMBEO DE AGUA POTABLE.

Ítem	Descripción	
1	<b>MOTOR ELÉCTRICO</b>	Ver anexo figura 57.
1.1	Potencia (HP)	150
1.2	Velocidad (RPM)	1780
1.3	Voltaje (voltios)	460
1.4	Corriente (amperios)	179
1.5	Tipo	Vertical
1.6	Aislamiento	F
1.7	Factor de servicio	1.15
1.8	Eficiencia	93.60%
1.9	Frame	L444TP16
1.1	Marca	General Electric
2	<b>TURBINA</b>	Ver anexo figura 56.
2.1	Marca	National Pump
2.2	Modelo	M10LC
2.3	Numero de etapas	12
2.4	Caudal (GPM)	400
2.5	Carga (pies)	720
3	<b>VARIADOR</b>	Ver anexo figura 55.
3.1	Marca	Schneider Electric
3.2	Modelo	Altivar 61 Telemecanique
3.3	Potencia (HP)	150
3.4	Protección	250 A/3P

*Tabla 6 Equipo actual en estación de bombeo La Sultana.*

A continuación vemos la imagen del variador Altivar 61HC11N4, vemos también la parte de la conexión del variador, el interruptor, las inductancias de red, cableado y la parte de control que se describió en los diagramas respectivos.



*Figura 28 Interior de gabinete de variador de velocidad Schneider Altivar 61.*

#### 26.1 PANTALLA DE SUPERVISION VW341103.

Terminal grafico remoto, con esto es posible emplear de una manera mas sencilla la configuracion del variador, visualizar los valores actuales (valores de entrada, salida, frecuencia, etc.)



*Figura 29 Terminal grafico de variador de velocidad Schneider Altivar 61.*

Vemos la imagen del motor de 150 hp que se encuentra instalado en la estación La Sultana.

Nota: este motor ya fue rebobinado tres veces.



*Figura 30 Motor eléctrico vertical de eje hueco General Electric, 150Hp en funcionamiento en estación de bombeo La Sultana.*

# CAPITULO 3.

## ESTUDIO ACTUAL DE SISTEMA DE BOMBEO, CONJUNTO MOTOR-BOMBA, MEDICIÓN DE EFICIENCIA BAJO MÉTODO STD. IEEE 739 Y CURVAS DE OPERACIÓN DE BOMBA.

---

### 1 MARCO NORMATIVO

La experiencia en el desarrollo, aplicación, pruebas y demás aspectos técnicos de los motores están registrados en normas técnicas, las cuales se han construido con el aporte de muchos técnicos e investigadores alrededor del mundo. Básicamente estas normas son las que rigen parámetros de funcionamiento como tensiones, corrientes, temperaturas, cantidad de armónicos que se traducen en pérdidas por calentamiento, problemas de vibraciones en el montaje entre otros. A continuación listamos las normativas bajo las cuales se analizarán los datos obtenidos:

- ❖ IEEE 739. Recommended Practice for Energy Management:
- ❖ IEEE 112. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.
- ❖ NEMA MG1. Motors and Generators.

En estas normas, se encuentran incluidos los aspectos relacionados con la eficiencia de los motores. Contienen entonces la clasificación de los motores según su nivel de eficiencia y aspectos relacionados con la metodología para su determinación.

### 2 DETERMINACION DE LA EFICIENCIA SEGÚN EL IEEE STD. 739

#### 2.1 ENCUESTAS DE MOTOR

Cuando los motores de inducción operan en el rango del 70-80% de eficiencia, la reducción de la potencia para cada punto porcentual es de aproximadamente 1 kW por 100 hp de la carga en operación. Así, si un motor de 100 hp funciona de forma continua durante un año, los ahorros provenientes de la mejora de su eficiencia en un punto porcentual serían:

$$8760 \frac{\text{horas}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ KW}}{100 \text{ HP}} * \frac{\$0.06}{\text{KWh}} * 100 \text{ HP} * 0.01 \text{ p.u} = \$526/\text{año}$$

Si se sustituye inmediatamente por un motor más pequeño (menor hp) si está disponible, los cambios en costos se estiman en \$ 500 a \$ 600, en concepto de material y mano de obra. Para identificar a los posibles candidatos se requiere una encuesta de motor.

La detección y el cambio de motores de inducción sobredimensionados a uno más pequeño y/o de mayor eficiencia, contribuirá en gran medida a la mejora de la eficiencia del sistema y del factor de potencia. Tales motores pueden ser detectados con el uso de dispositivos tales como un tacómetro digital estroboscópico. Tenga en cuenta que se requiere un tacómetro digital para permitir la lectura de la velocidad.

La velocidad de funcionamiento real de un motor de inducción depende del diseño del motor y la carga en el eje. La velocidad a plena carga se indica en la placa de identificación del motor. El deslizamiento calculado a partir de datos de la placa es generalmente exacto en tan sólo  $\pm 1 \%$ , debido a las variaciones en los niveles de tensión y el equilibrio en los terminales del motor. El deslizamiento a plena carga en rev / min es la diferencia entre el deslizamiento síncrono también en rev / min y a plena carga también en rev / min:

Deslizamiento (r/min) = síncrono (r/min) - funcionando (r/min)

Para un motor de cuatro polos con una velocidad a plena carga de 1,700, que sería:

$1800 - 1700 = 100 \text{ r / min deslizamiento.}$

La medición del deslizamiento para determinar la carga del motor es una técnica útil cuando se trata de la auditoría energética típica, que implica una serie de motores debido a que las variaciones en (1) los datos de placa del motor, (2) la tensión de línea en el motor, y (3) temperatura del estator del motor puede tender a promediar sobre una base estadística. La técnica de deslizamiento no es tan exacta o útil cuando se está evaluando la carga de un solo motor.

La precisión de los datos de la placa de identificación se aborda en NEMA MG 1-1993 [B11] en la sección 12.46, y el texto no ha sido cambiado desde principios de los años sesenta. La norma establece, " La variación de los datos placa o el dato de velocidad estampado, de corriente alterna, monofásicos y polifásicos, los motores de potencia integral no podrán superar el 20 por ciento de la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad nominal cuando se mide a tensión nominal, frecuencia y carga

con una temperatura ambiente de 25°C." En la práctica, la mayoría de los fabricantes puede mantener una tolerancia del 5 % de los valores nominales de placa; sin embargo, hay excepciones.

La mayoría de los fabricantes de motores, al especificar las rpm a plena carga, toman sus lecturas a 25°C o con el motor frío. Un error común en la lectura de las rpm a plena carga con un tacómetro de precisión con el motor caliente es que la lectura arroja una aparente sobrecarga. El aumento de la temperatura estándar de motores de inducción se puede medir ya sea por el método termómetro (T) o el método de la resistencia (R). El método (T) se utiliza generalmente para el estampado de la placa de identificación. La diferencia entre el método (T) y el (R) es que el método (R) utiliza un detector de tipo resistencia incrustado en los arrollamientos para determinar el aumento de la temperatura del motor. En el caso de los datos (R), el aumento de temperatura permisible es de aproximadamente 10°C más alta que la del método (T) para el mismo punto en la medición.

El aumento del deslizamiento por cada grado Celsius aumenta en el rango de 0.342 hasta 0.380 para motores de 10 HP y mayores. Por ejemplo, un motor trifásico de 10 hp a 1725 rpm está funcionando a 2°C por encima de la temperatura ambiente de 25°C. El verdadero deslizamiento a plena carga es calculado de la siguiente manera:

$(0.342\% \text{ por grado Celsius de aumento}) (20^\circ \text{ C}) + \text{incremento } 6.84\%$

$(1.0684) (1800-1725) + (1.0684) (75) = 80.13 \text{ rpm deslizamiento a plena carga}$

La velocidad corregida a plena carga es entonces  $(1800 - 80.13) = 1719.87 \text{ rpm}$

La variación en el deslizamiento debido a los cambios en el voltaje es proporcional al inverso del cuadrado de la relación de voltaje. Así, cuando el voltaje de la red está por encima de 460 V, el rango de deslizamiento a plena carga se reduce. Del mismo modo, cuando el voltaje de funcionamiento es inferior 460 V, se incrementa el rango de deslizamiento a plena carga. Por ejemplo: un motor con una tensión nominal de 460 V en funcionamiento con un 5 % reducción en el voltaje de línea de 437 V tendría un aumento del deslizamiento a plena carga a 110.8 % del dato de placa. Un aumento de 5 % a 483 V se reduciría el deslizamiento al 90.7 % del valor de placa. Siempre es deseable para obtener las lecturas de voltaje y corriente en cada arranque del motor o el motor desconectado cuando se lleva a cabo una encuesta de motor, lo que permite la corrección de la tensión de ser necesario.

También se puede hacer una comprobación de la carga del motor, tomando la relación de amperios en funcionamiento medidos en comparación a los amperios a plena carga del dato de placa. Este factor es válido si los amperios medidos están por encima de 55 a 65 % de la capacidad de plena carga, que es el rango donde los amperios son lineales con la carga.

Otra magnitud a revisar con el motor bajo carga es la potencia rms de entrada del motor con un vatímetro. Comparando los kilovatios medidos con los kilovatios calculados, en base a un 'valor de eficiencia asumido' generalmente disponible por el fabricante. Por ejemplo:

$$Carga\ de\ motor = \frac{kW\ medidos}{HP\ de\ la\ placa * 0.746 * eficiencia\ del\ motor} \quad (44)$$

La determinación más exacta de la carga del motor es tener los datos de prueba del dinamómetro en un laboratorio certificado de un taller certificado de rebobinado de motores. Estos datos se mantienen en un archivo para permitir más comparaciones. Esta técnica es cara y lo más probable que se utilicen sólo para los motores grandes y / o críticos en una instalación.

En resumen, la técnica de medición de deslizamiento es útil para las auditorías energéticas para identificar posibles ahorros desde el cambio de motores sobredimensionados a motores más pequeños, motores de alta eficiencia que funcionan en un mayor porcentaje de la carga total. Cuando se trata de motores específicos, se deben considerar obtener medidas adicionales de voltaje, amperaje y temperatura y el uso de los factores de corrección apropiados detallados anteriormente.

Como se detalla en la figura 34, la medición de la salida del motor se basa en el principio de que el deslizamiento es lineal desde el 10% de carga hasta el 110% de carga. Por ejemplo, el motor de cuatro polos que se discutió anteriormente se encontró que funciona a 1760 r / min. Si el dato de placa es de 10 hp, cuál era la potencia de salida en ese momento?

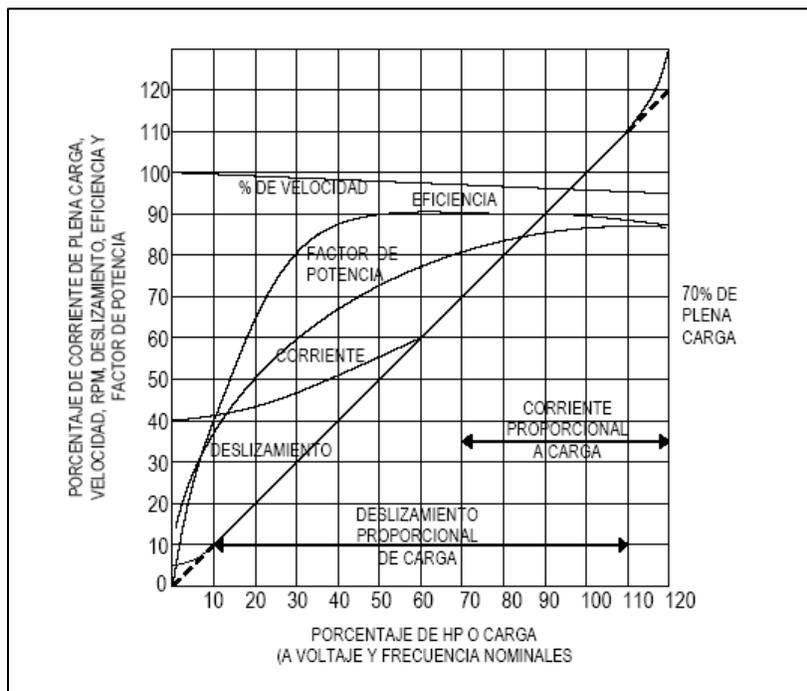
Deslizamiento a plena carga = 1800 - 1700 = 100 r / min = 100% de carga.

Deslizamiento en marcha = 1800 - 1760 = 40 r / min.

Funcionando bajo carga = (deslizamiento en marcha) / (deslizamiento a plena carga) = 40/100 = 0.40

Carga de salida = 10 hp × 0.40 = 4 hp.

Nota: Tenga en cuenta que por debajo del 50 % de los amperios a plena carga, la corriente del motor no es una medida válida de la carga del motor. Debido a la disminución en el factor de potencia del motor, más y más de la corriente aparente es amperios reactivos como la carga del motor disminuye.



*Figura 31 Curva típica motor de inducción diseño B, NEMA.*

Los mayores beneficios del uso de esta técnica con tacómetros ópticos y mecánicos digitales son las siguientes:

- ❖ La capacidad de localizar los motores de inducción con poca carga (sobredimensionados) de manera rápida.
- ❖ Capacidad para vigilar la carga de los equipos frente a otras condiciones tales como rendimiento, condiciones de filtro, temperatura, y presión.
- ❖ Capacidad para determinar la eficiencia aproximada del motor en cualquier régimen de carga cuando se utiliza vatímetro convencional en los cables de entrada del motor.
- ❖ Capacidad para ayudar a dimensionar los requerimientos del motor en un futuro, sobre la base de datos de carga actual.

- ❖ Capacidad para ayudar a los mecánicos de mantenimiento en la comprobación periódica de la carga del motor, lo que ayudaría a detectar baleros gastados, filtros obstruidos, etc.

Para determinar la eficiencia del motor, se requiere un equipo adicional para proporcionar datos sobre la entrada de energía al motor. [3]

## 2.2 MÉTODO DE MEDICIÓN

El método de medición utilizado es el Método descrito en IEEE Std. 739-1995 sección 6.16, auxiliándose con IEEE Std. 112-1996 y NEMA MG-1 rev. 2004.

El método de Carga-Deslizamiento descrito en IEEE Std. 739, es un procedimiento mediante el cual es posible la evaluación del parámetro eficiencia de un motor de una manera rápida y con una aceptable aproximación, recomendado cuando no es factible desmontar el motor, ya que implicaría que se dejaría de prestar algún servicio o se tendrían pérdidas económicas de producción, debido al tiempo de suspensión que conlleva la evaluación si se efectúa con otros métodos, como los que se describen en IEEE Std. 112-1996.

El método consiste en medir la velocidad de operación en carga real en el sitio donde la maquina este funcionando, de esa manera, obtener el deslizamiento de operación y dividirlo con el deslizamiento de plena carga, especificado en el dato de placa del motor, y así determinar el porcentaje de carga de operación del motor y conocer la potencia de salida desarrollada en el eje del motor basándose en el principio de que el deslizamiento es lineal desde el 10% al 110% de carga. Apoyándose de un equipo de medición de potencia, voltaje y corriente a la entrada del motor es posible conocer la eficiencia del motor dividiendo la potencia activa de salida entre la potencia activa de entrada. Estos procedimientos se deben hacer en condiciones de frecuencia y Voltaje Nominal, y que el desbalance de voltaje no exceda el 0.5%( según IEEE 112 sección 4.1.5) a temperatura ambiente de 25°C.

Los métodos descritos en IEEE Std. 112-1996 son más exactos y recomendados que el del deslizamiento, pero tienen el inconveniente de que la maquina tiene que ser desmontada y trasladada hasta el laboratorio para efectuar los procedimientos de evaluación, según se requiera estos métodos pueden ser A, B, C, D, E y F.

Se manejan como válidos los datos de eficiencia que se obtengan en motores cuyas cargas de trabajo se encuentren superiores a 55% de la nominal.

### 2.3 CORRECCIONES AL DESLIZAMIENTO PLENA CARGA DEBIDO A CAMBIOS EN EL VOLTAJE Y TEMPERATURA AMBIENTE.

Cuando el motor a evaluar se encuentra operando a un voltaje diferente del nominal, superior o inferior al nominal, el motor recibe un impacto en el deslizamiento de plena carga en un factor igual al cuadrado del inverso de la proporción de voltaje con respecto al nominal, de esa manera un aumento en variación de voltaje implica una disminución en deslizamiento de plena carga, y una disminución en el voltaje de alimentación con respecto al nominal se traduce a un aumento del deslizamiento de plena carga. Por lo que la correspondiente corrección debido a variación de voltaje se debe hacer cuando se calcule el deslizamiento de plena carga cuando sea requerido.

Otra corrección que hay que hacer para determinar el deslizamiento de plena carga es cuando el motor se encuentra trabajando fuera de la temperatura ambiente de 25°C. Ya que un incremento en la temperatura ambiente conduce a un incremento de 0.342% a 0.380% en el deslizamiento de plena carga por cada grado centígrado superior a la de 25°C. [3]

### 2.4 PROCESO DE MEDICIÓN

Los pasos a seguir para la recopilación de datos en cada motor es la siguiente<sup>1</sup>:

- ❖ Medición de parámetros de entrada al motor (potencia, voltaje, corriente, etc.)
- ❖ Obtención de Datos de Placa, recopilación de datos en el formulario sugerido por Std. IEEE 739 para motores de inducción.
- ❖ Medición de Temperatura Ambiente y del estator del motor utilizando un Termómetro Óptico.
- ❖ Medición de velocidad de operación en el eje del motor utilizando un Tacómetro óptico Estroboscópico.

---

<sup>1</sup> Llenar con los datos obtenidos de "PROCESO DE MEDICION" el formulario propuesto por Std. IEEE 739 Sección 6.17

### 3 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA SEGÚN EL STD IEEE 112

Esta norma titulada IEEE Standard Procedure for polyphase induction motors and Generators es de gran reconocimiento en el mundo de los motores y ha servido de referencia desde hace varios años para la ejecución de las pruebas de eficiencia. La versión más reciente es la del año 2004 y es la edición que se toma como base para el análisis que se presenta a continuación.

#### 3.1 TIPOS DE PÉRDIDAS

- ❖ Pérdidas  $I^2R$  del estator.
- ❖ Pérdidas  $I^2R$  del rotor.
- ❖ Pérdidas por fricción y ventilación.
- ❖ Pérdidas en el núcleo.
- ❖ Pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Pérdidas por contacto en las escobillas.

#### 3.2 MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

Esta norma considera los siguientes métodos para la determinación de la eficiencia:

- ❖ Método A. Medición directa de las potencias de entrada y salida.
- ❖ Método B. Mediciones de entrada y salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Método B1. Mediciones de entrada y salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga y una temperatura asumida.
- ❖ Método C. Máquinas duplicadas con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Método E. Medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y medición directa de las pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Método E1. Medición de la potencia eléctrica bajo carga con segregación de pérdidas y valor asumido de las pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Método F. Circuito equivalente con medición directa de las pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Método F1. Circuito equivalente con valor asumido de pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Método C / F. Circuito equivalente con punto de carga calibrado por método C y medición indirecta de las pérdidas adicionales en carga.

- ❖ Método E / F. Circuito equivalente con punto de carga calibrado por método E y medición directa de las pérdidas adicionales en carga.
- ❖ Método E1 / F1. Circuito equivalente con punto de carga calibrado por método E y valor asumido para las pérdidas adicionales en carga.

### 3.3 SELECCIÓN DEL MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

El método A se utiliza solamente para motores con potencia menor a 1 kW. Los motores horizontales entre 1 y 300 kW deben probarse por el Método B.

Las máquinas verticales entre 1 y 300 kW deben probarse por el método B si los rodamientos lo permiten. En caso contrario, deben probarse con los métodos E, E1, F ó F1 pueden ser usados.

Las máquinas con potencias superiores a 300 kW deben probarse con los métodos B, B1, C, E, E1, f ó F1 dependiendo de la disponibilidad de los equipos y de las facilidades de prueba. Cuando sea práctico, se pueden usar combinados los métodos C/F, E/F ó E1/F1 los cuales dan el nivel de confiabilidad de una prueba de carga y la ventaja de la simplicidad de solución del circuito para varias cargas.

### 3.4 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE ACUERDO AL MÉTODO B.

Dado que la mayoría de los motores que se utilizan en la industria quedan cubiertos por el rango de potencias para el cual se exige la aplicación del método B, este es el de mayor interés y por tanto se describe a continuación.

De acuerdo con este método, inicialmente se calculan las pérdidas totales aparentes como la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida, ambas medidas durante los ensayos. Luego se calculan separadamente los valores de las diferentes componentes de pérdidas (pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre ó aluminio del rotor, pérdidas en el núcleo y pérdidas por fricción y ventilación). La diferencia entre el valor de las pérdidas aparentes y la suma de las pérdidas calculadas separadamente, representa las pérdidas adicionales en carga.

Se dibuja entonces una gráfica de pérdidas adicionales en carga en función del valor del torque el cuadrado, se hace un análisis de regresión y se determinan las pérdidas adicionales como el valor de esta función para torque cero. Con este valor de pérdidas adicionales en carga se determinan, las pérdidas totales finales y se calcula la eficiencia.

La norma establece una secuencia definida de las pruebas que se deben ejecutar para la determinación de la eficiencia de un motor. Esto no significa que las pruebas tengan que realizarse una inmediatamente después de la otra, simplemente deben cumplir el orden de ejecución. Lo que sí es requisito y debe cumplirse, es que para cada prueba individual, el motor debe tener una temperatura cercana a la temperatura establecida para dicha prueba.

Las pruebas en la que se basa el método de determinación de la eficiencia son las que se mencionan a continuación. Las pruebas no se describen en detalle, solamente se menciona en qué consiste cada una.

Medición de la resistencia en frío. Con la máquina a temperatura ambiente, se mide la resistencia de los devanados del estator.

Prueba de temperatura a carga nominal. Se le aplica carga nominal al motor haciendo la verificación mediante un dinamómetro y se establece la temperatura de estabilización de los devanados del estator en esta condición.

Prueba bajo carga. Se carga el motor con diferentes valores de potencia utilizando un freno y se registran los valores de las variables de funcionamiento (corriente, potencia de entrada, voltaje, velocidad, torque, etc.) para cada una de las condiciones de carga. La prueba se realiza a una temperatura cercana a la determinada en el ensayo anterior.

Prueba sin carga. Se ejecuta una prueba sin carga variando la tensión de alimentación empezando con 125% de la tensión nominal y disminuyendo hasta que la corriente tienda a incrementar.

Con los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se hacen los cálculos y correcciones indispensables para determinar la eficiencia. Estos cálculos se describen a continuación.

Pérdidas por fricción y ventilación. Primero se calcula, para cada valor de tensión aplicada en la prueba sin carga, la diferencia entre la potencia de entrada y el valor de las pérdidas en los devanados del estator. Después se construye una gráfica con estos valores en función del cuadrado de la tensión aplicada; se aplica un método de

regresión a esta función y se extrapola; el valor de la función en U2 igual a cero es el valor de las pérdidas por fricción y ventilación.

Pérdidas en el núcleo. Se obtienen a partir de los resultados de la prueba sin carga, restando de la potencia de entrada las pérdidas en los devanados del estator (obviamente en vacío) y las pérdidas por fricción y ventilación.

Pérdidas I<sup>2</sup> R del estator. Para este cálculo se usa el valor de la resistencia medida en frío y corregida para la temperatura registrada en el ensayo de calentamiento con carga nominal.

Pérdidas I<sup>2</sup> R del rotor. Este valor se calcula con base en el deslizamiento real medido durante la prueba con carga y no requiere correcciones.

Pérdidas adicionales en carga. Al valor de pérdidas aparentes calculado inicialmente se le resta la suma de las pérdidas descritas en los cuatro títulos anteriores. Este valor se representa en una gráfica como función del torque al cuadrado, luego se hace una regresión y se extrapola la curva. El punto de corte de esta gráfica con el eje de potencia es el valor de las pérdidas adicionales en carga. [4]

#### 4 APLICANDO EL METODO DE STD. IEEE 739.

Antes de aplicar el método del Std. 739 se verifica la cargabilidad del motor (Motor Load), así como su factor de corriente de carga, dependiendo de estos resultados será aplicable ó no el procedimiento.

$$Carga\ de\ Motor = \frac{Kw\ medidos}{HP\ de\ placa * 0.746 * eficiencia} \quad (45)$$

$$Carga\ de\ Motor = \frac{Kw\ medidos}{HP\ de\ placa * 0.746 * 0.936}$$

$$Carga\ de\ Motor_{m\acute{a}ximo} = \frac{65.71}{150 * 0.746 * 0.936}$$

$$Carga\ de\ Motor_{m\acute{a}ximo} = 0.627$$

$$Carga\ de\ Motor_{m\acute{a}ximo} = 62.7\%$$

$$Carga\ de\ Motor_{promedio} = \frac{53.433}{150 * 0.746 * 0.936}$$

$$Carga\ de\ Motor_{promedio} = 0.51$$

$$Carga\ de\ Motor_{promedio} = 51.0\ \%$$

$$Factor\ de\ Corriente\ de\ Carga_{promedio} = \frac{Amperios\ Medidos\ Promedio}{Amperios\ Nominales} \quad (46)$$

$$Factor\ de\ Corriente\ de\ Carga_{promedio} = \frac{94.947}{179}$$

$$Factor\ de\ Corriente\ de\ Carga_{promedio} = 0.53$$

#### 4.1 LLENADO DE FORMULARIO, PROPUESTO POR STD. IEEE 739.

A partir de los resultados de cargabilidad y factor de corriente de carga, el Std. 739 no es aplicable, debido a que se encuentra por debajo de lo requerido por el Std. para que sea aplicable, sin embargo podemos hacer una prueba de llenado del formulario propuesto por el Std. que se muestra a continuación:

	DATOS	
HP Plena Carga	150	150
Voltaje (V)	460	460
Amperios (A)	179	179
Velocidad Plena Carga (rpm)	1780	1630
Velocidad Síncrona (rpm)	1800	1650
Numero de Polos	4	4
Deslizamiento Plena Carga (rpm)	20	20
Voltaje AB	483.80	483.8
Voltaje BC	483.90	483.9
Voltaje CA	484.00	484
Voltios Promedio (V)	483.90	483.9
Amperios Promedio (A)	93.30	93.3
KW Promedio	53.433	53.433
Velocidad de Operación (rpm)	1647	1647
Temperatura Ambiente (°C)	28.70	28.7
Temperatura Estator (°C)	52.20	52.2
Frecuencia Nominal (Hz)	60	55

Tabla 7 Formulario propuesto por el std. 739.

	DATOS	
Variación de Voltaje	5.20	5.20
Deslizamiento Corregido por Voltaje (rpm)	18.07	18.07
Deslizamiento Corregido por Temperatura (rpm)	21.61	21.61
Deslizamiento Corregido Total (rpm)	19.84	19.84
Deslizamiento de Operación (rpm)	153	3
Porcentaje de Carga	771	15
HP Salida	1156.74	22.68
KW Salida	862.93	16.92
Eficiencia (%)	1614.97	31.67
KVA Entrada	78.20	78.20
Factor de Potencia	0.68	0.68
KW Perdidas	-809.49	36.51

*Tabla 8 Formulario propuesto por el std. 739*

Se observa que los valores no son congruentes ya que el cálculo de parámetros se basa en el deslizamiento, y el deslizamiento en operación es de 153 rpm, este valor es ocupado para calcular el siguiente campo y así sucesivamente, es entonces que se producen resultados erróneos. A diferencia de los cálculos para cuando la frecuencia se modifica los resultados parecen ser aceptables, pero el método es específico en cuanto a tomarlos en cuenta o no, en este caso el método lo descarta y considera que los resultados no son válidos.

#### 5 CÁLCULO ESTIMADO, FÁCTURA MENSUAL A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS.

	GRAN DEMANDA
	MTMH
COMERCIALIZACION US\$/Usuario-Mes	14.809779
PUNTA US\$/kWh	0.128656
RESTO US\$/kWh	0.127607
VALLE US\$/kWh	0.126822
CARGO POR DISTRIBUCION US\$/kW-Mes	6.939401

*Tabla 9 Precios de energía y costos fijos de pliego tarifario vigente, distribuidora DELSUR.*

kW Promedio	53.433
POTENCIA MAXIMA PICO (kW)	65.710

*Tabla 10 Consumos registrados durante periodo de medicion.*

<b>FACTURA MENSUAL</b>	
	GRAN DEMANDA
	MTMH
COMERCIALIZACION US\$/Usuario-Mes	14.809779
PUNTA US\$/kWh	1031.171407
RESTO US\$/kWh	2659.185684
VALLE US\$/kWh	1219.766387
CARGO POR DISTRIBUCION US\$/kW-Mes	455.988040
TOTAL USD\$	5,380.92

*Tabla 11 Estimacion de factura mensual, sin IVA.*

Cálculo estimado de factura mensual en base a pliego tarifario vigente a partir de 15 de Abril de 2015, empresa distribuidora DELSUR, gran demanda, consumos mayores a 50 kW. La estimacion anterior es calculada sin el recargo por bajo factor de potencia especificada en la normativa terminos y condiciones emitida por siget.

El total a pagar en gran demanda medido en media tensión con medidor horario es aproximadamente de UD\$ 5,380.92.

A partir del registro de parámetros en el periodo de medición en el plantel La Sultana, se registra un bajo factor de potencia de 0.83, dada esta problemática se calcula un recargo en el precio de la energía el cual modifica el valor de la factura mensual, el cálculo del recargo por bajo factor de potencia y el nuevo valor de la factura se detalla a continuación.

Factor de potencia requerido	0.90
Factor de potencia actual	0.83
Diferencia	0.07

*Tabla 12 Factor de potencia requerido, encontrado y diferencia.*

Cobro por energía sin recargo	\$ 4,910.12
Recargo por bajo factor de potencia	\$ 343.71
Cobro por energía con recargo	\$ 5,253.83

*Tabla 13 Cálculo de recargo por bajo factor de potencia [7].*

<b>FACTURA MENSUAL</b>	
	GRAN DEMANDA
	MTMH
COMERCIALIZACION US\$/Usuario-Mes	14.809779
PUNTA US\$/kWh	1031.171407
RESTO US\$/kWh	2659.185684
VALLE US\$/kWh	1219.766387
CARGO POR DISTRIBUCION US\$/kW-Mes	455.988040
TOTAL USD\$	5,724.63

*Tabla 14 Nueva estimacion mensual con recargo por bajo factor de potencia, sin IVA.*

<b>FACTURA MENSUAL</b>	
Factura estimada sin recargo	\$ 5,380.92
Factura estimada con recargo	\$ 5,724.63

*Tabla 15 Diferencias en factura mensual estimada.*

## 6 MEDICIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS.

A continuación se observa el resultado de las mediciones de los parámetros hidráulicos de la estación de bombeo de La Sultana. Dichos parámetros son la presión con la que se está inyectando a la red de agua potable así como el caudal instantáneo con el cual se alimenta el sistema. Estos datos nos servirán para analizar la situación actual del sistema de bombeo en la parte hidráulica y así determinar si el sistema en las condiciones actuales presenta una eficiencia considerable o el en caso contrario es totalmente ineficiente.

Los registros de los datos se llevaron a cabo entre las fechas del 29 de abril de 2015 hasta el 5 de mayo de 2015.

6.1 REGISTRO OBTENIDO DE MONITOREO DE CAUDAL Y PRESION CADA HORA, DURANTE SIETE DIAS.

	29/ 04/ 201 5		30/ 04/ 201 5		01/ 05/ 201 5		02/ 05/ 201 5		03/ 05/ 201 5		04/ 05/ 201 5		05/ 05/ 201 5	
Ho ra	PSI	L/ s	PSI	L/ s	PSI	L/ s	PSI	L/ s		L/ s	PSI	L/ s	PSI	L/ s
0			59	20	70	18	75	16	63	18	78	18	65	20
1			60	20	70	18	75	16	73	16	78	16	70	18
2			65	18	70	16	75	18	75	16	78	16	70	18
3			65	18	70	16	80	16	75	16	82	14	75	16
4			75	16	80	18	80	16	85	14	88	12	80	14
5			79	14	80	18	85	14	85	14	85	13	80	14
6			75	17	70	18	68	18	70	16	65	18	80	14
7			79	18	70	18	62	18	66	18	65	18	75	16
8			75	18	65	18	60	19	63	18	65	18	75	16
9			70	18	65	18	58	19	72	17	65	18	70	18
10			70	18	65	18	58	20	72	17	65	18	70	18
11			65	18	65	18	58	20	73	16	65	18	70	18
12	53	21	65	18	65	18	60	19	73	16	65	18	70	18
13	55	21	60	18	60	16	62	19	76	15	65	18	70	18
14	55	20	60	18	60	20	62	18	78	14	65	18		
15	56	21	60	18	60	20	65	18	81	16	65	18		
16	55	20	60	18	60	20	65	18	83	17	65	18		
17	55	20	60	18	60	18	65	18	83	16	65	18		
18	55	20	65	18	65	18	68	17	82	16	65	20		
19	58	20	65	18	65	18	70	17	75	16	60	20		
20	60	19	65	18	65	18	70	17	72	16	65	20		
21	58	20	65	20	70	18	72	17	73	16	65	20		
22	58	20	65	20	70	18	73	18	72	16	65	20		
23	60	20	65	20	70	18	65	18	72	16	65	18		

*Tabla 16 Datos hidráulicos de presión y caudal instantáneo.*

6.2 PROMEDIO DE PRESIONES Y CAUDALES DURANTE EL PERIODO DE MEDICION.

HORA	PRESION PROMEDIO (PSI)	CAUDAL PROMEDIO (L/s)
0	67	18.3
1	71	17.3
2	73	17.0
3	75	16.0
4	82	15.0
5	83	14.5
6	71	16.8
7	69	17.7
8	67	17.8
9	66	18.0
10	65	18.2
11	64	18.0
12	64	18.3
13	64	17.9
14	63	18.0
15	65	18.5
16	65	18.5
17	65	18.0
18	67	18.2
19	66	18.2
20	66	18.0
21	67	18.5
22	67	18.7
23	66	18.3

*Tabla 17 Datos hidráulicos promedio de presión y caudal instantáneo.*

### 6.3 GRAFICAS PROMEDIO.

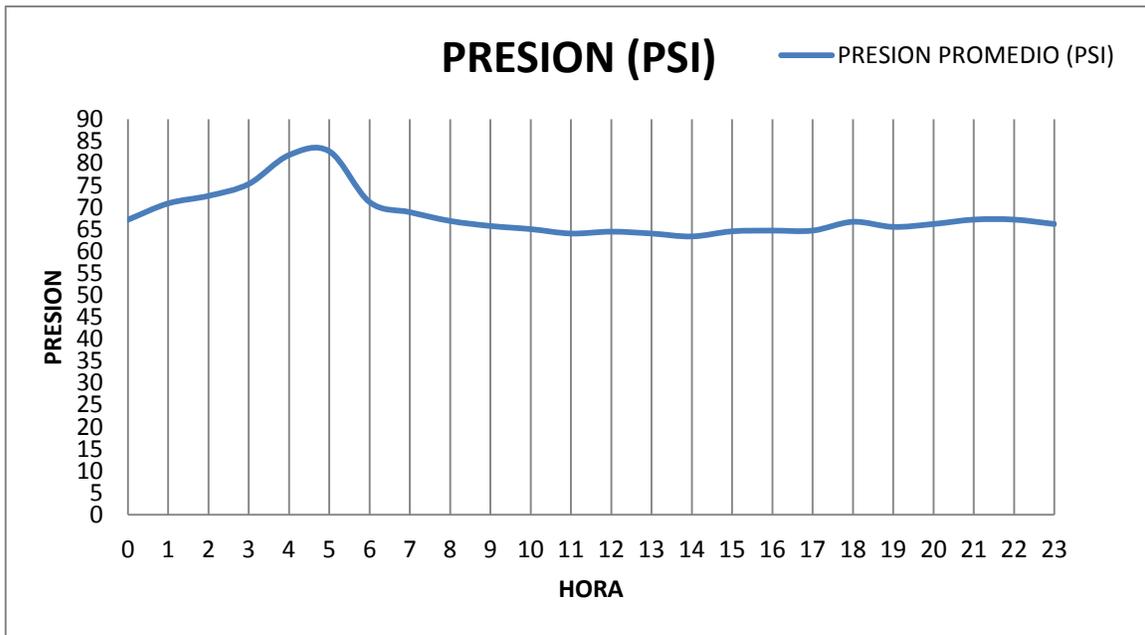


Figura 32 Grafica de datos promedio de presion-hora

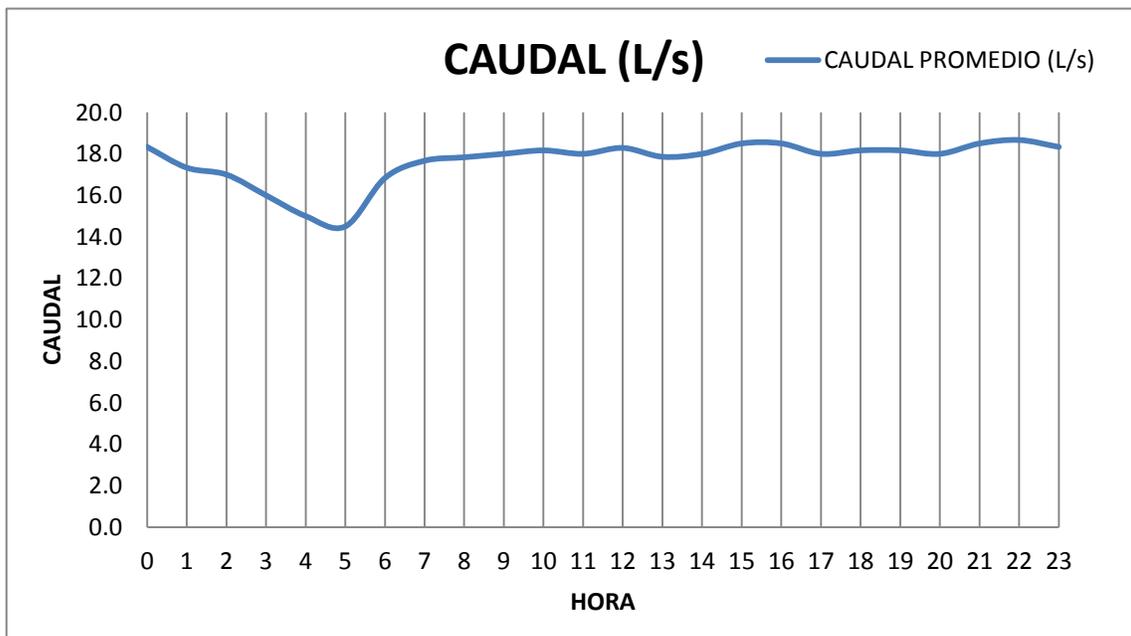


Figura 33 Grafica de datos promedio de caudal-hora.

#### 6.4 GRAFICAS CAUDAL Y PRESION.

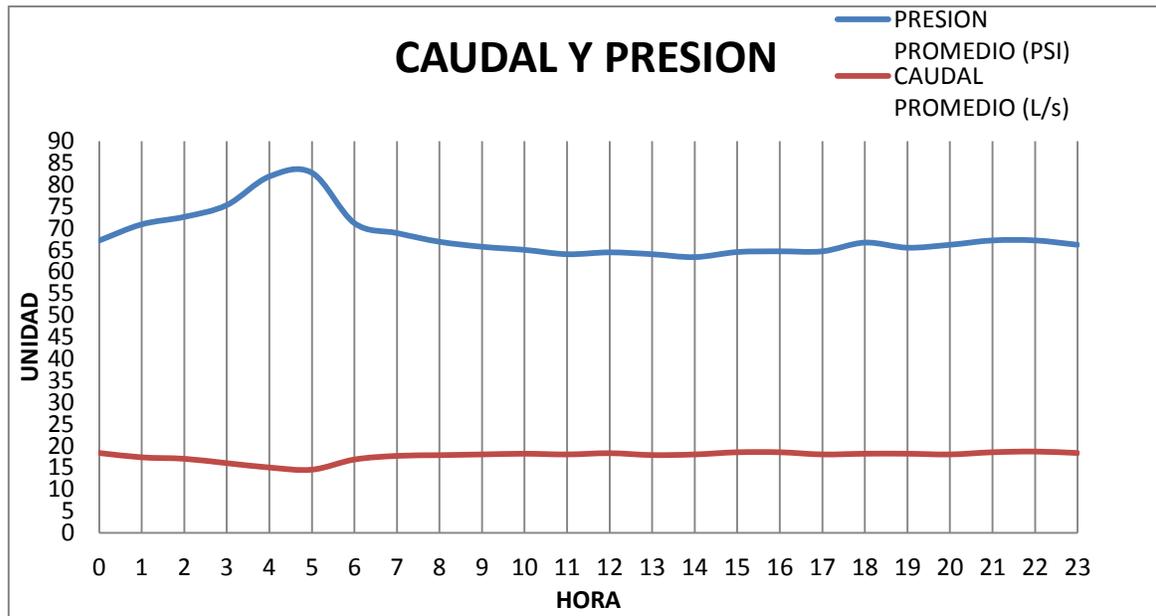


Figura 34 Grafica en conjunto de datos promedio de caudal-hora presión-hora.

#### 6.5 PRODUCCION ACTUAL VS. PRODUCCION ESPERADA.

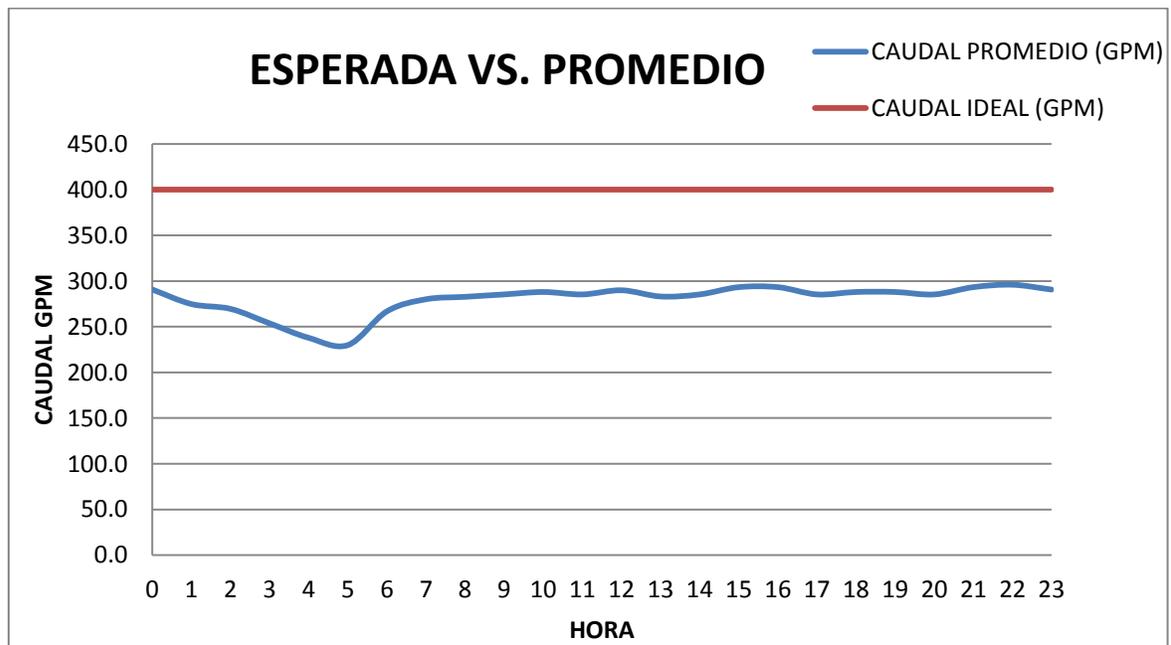


Figura 35 Grafica de datos promedio de caudal-hora comparada con lo esperado por la bomba.

6.6 CURVA NOMINAL DE BOMBA HIDRAULICA PARA EXTRACCION DE AGUA POTABLE ENCONTRADA EN PLANTEL LA SULTANA Y AVANICO DE DEMANDA ENCONTRADO.

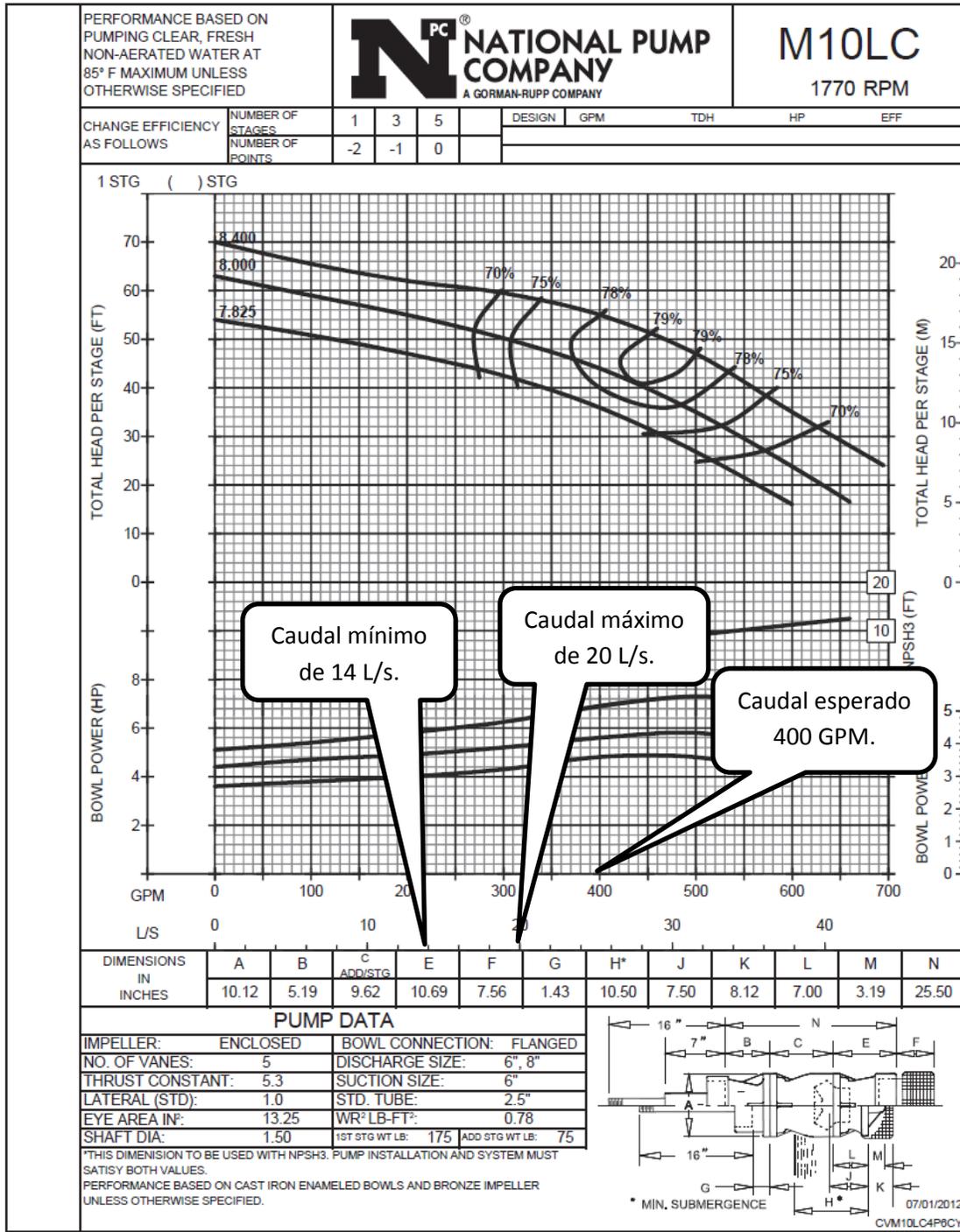


Figura 36 Curva nominal de bomba m10lc, rango de caudal de entrega encontrado.

## 7 MEDICION DE PARAMETROS ELECTRICOS.

En la medicion de los parametros electricos podremos ver dos mediciones distintas:

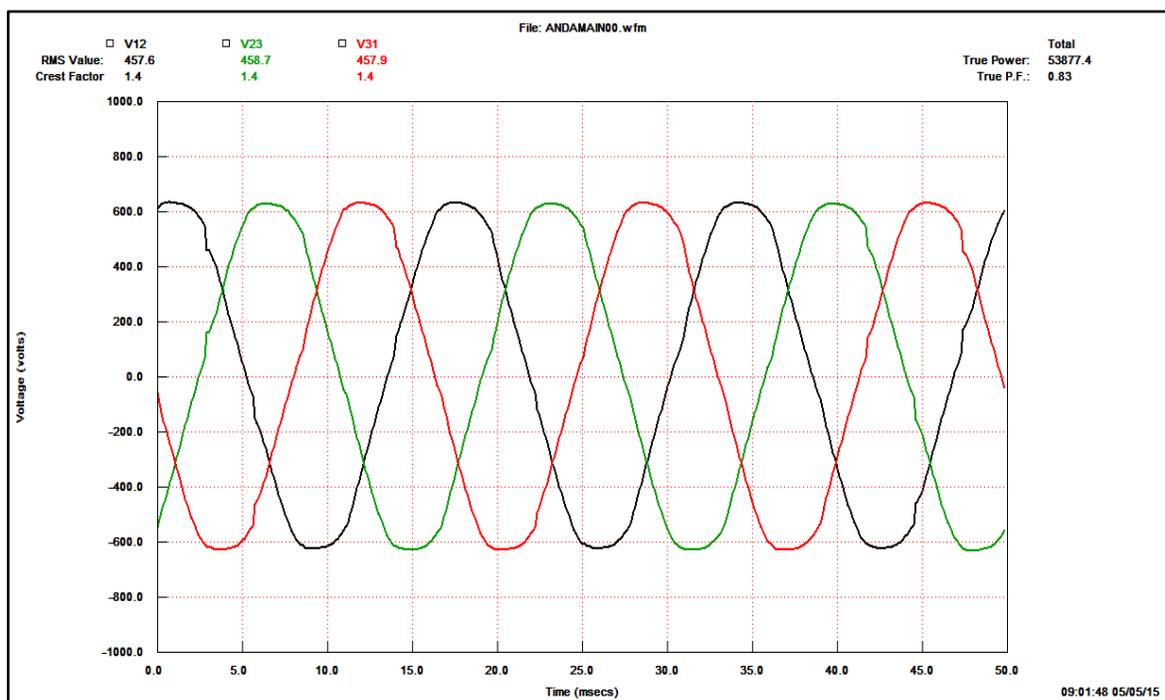
- ❖ Mediciones aguas arriba del variador: estos valores serviran para tener una mejor informacion en cuanto al nivel de tension servido, factor de potencia del banco de transformadores, regulacion de tension, cantidad de armonicos en la red, etc. En resumen todos aquellos indicadores que faciliten las tomas de decisiones en las mejoras de la red electrica de la estacion de bombeo.
- ❖ Mediciones aguas abajo del variador: con estas mediciones se trata de evaluar la tension y la corriente con la que se alimenta el motor de induccion instalado en la estacion de bombeo, la potencia que se le suministra al motor, la cantidad de armonicos que el variador le inyecta al estator del motor, factor de potencia de operaci3n del motor, frecuencia de operaci3n, Etc.

Todos estos parametros serviran para analizar desde el punto de vista electrico si las condiciones de operaci3n del motor son las optimas o de igual manera si deben de mejorarse hasta el punto de un reemplazo de motor, implementacion de soluciones para mejorar el servicio electrico entre otros puntos.

### 7.1 MEDICIONES EN EL BANCO DE TRANSFORMADORES.

Las siguientes graficas muestran los distintos parametros electricos medidos aguas arriba del interruptor principal. Las fechas de medicion son las mismas en las que se midieron los parametros hidraulicos.

## 7.1.1 GRAFICAS DE TENSIONES DEL BANCO DE TRANSFORMADORES.



*Figura 37 Graficas de tensión aguas arriba de interruptor principal.*

De las graficas obtenemos las siguientes conclusiones:

- ❖ La estación de bombeo opera a factor de potencia de 0.83, se encuentra por debajo de 0.90 que es el valor sugerido por SIGET [7].
- ❖ La conexión del banco de transformadores es en disposición estrella-delta proporcionando una tensión secundaria de 460/266 V y en promedio la subestacion nos ofrece 458.07 Vrms.
- ❖ El factor de cresta de la tensión senoidal es de 1.4 y es de valor aceptable.
- ❖ La potencia real que provee la subestacion es de 53.8774 kW.

## 7.1.2 GRAFICAS DE CORRIENTES DEL BANCO DE TRANSFORMADORES.

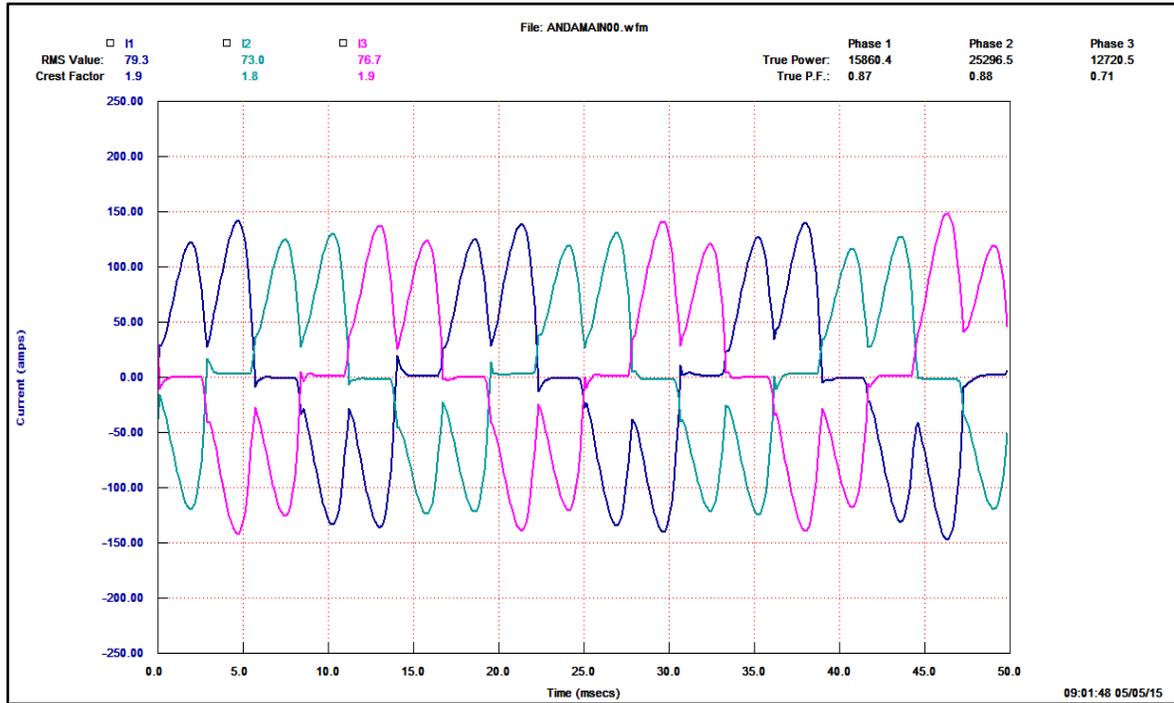


Figura 38 Graficas de corrientes, tomadas aguas arriba de interruptor principal.

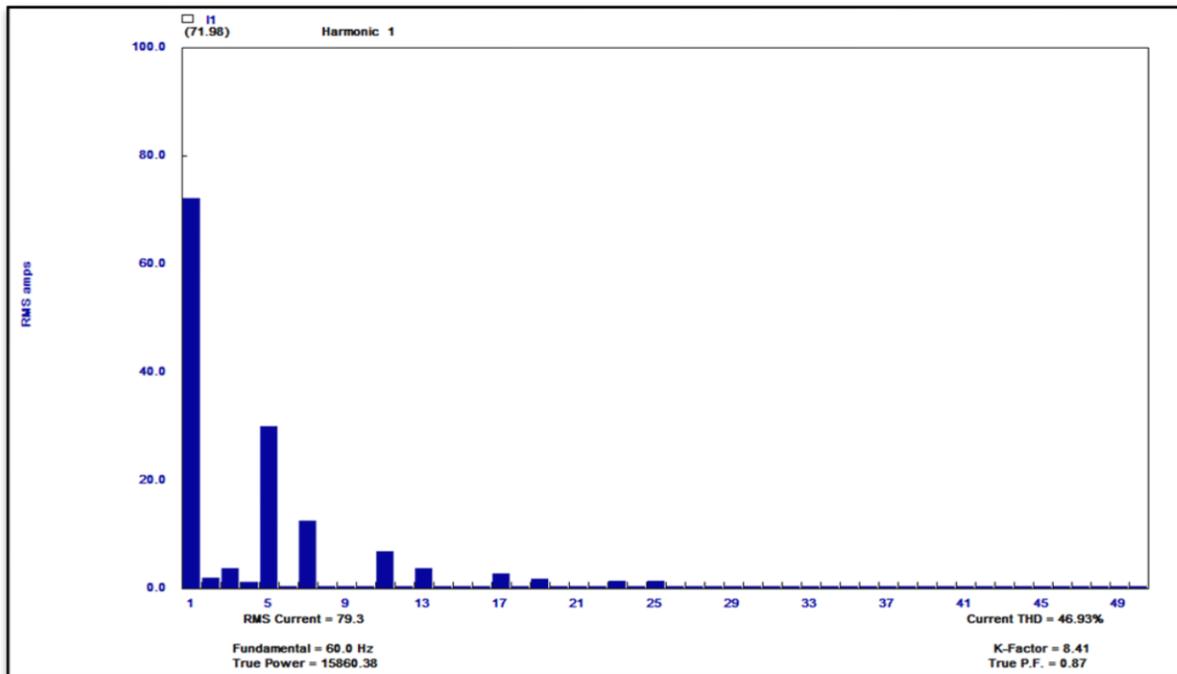


Figura 39 Graficas de la distorsión armónica de la corriente del interruptor principal.

En las gráficas de corriente se puede observar que no es una onda senoidal pura sino que se ve afectada por armónicos debido a que está presente una carga electrónica la cual es el variador. Debido a ello pues los demás parámetros eléctricos tales como factor de potencia, factor de cresta y la potencia real no son uniformes.

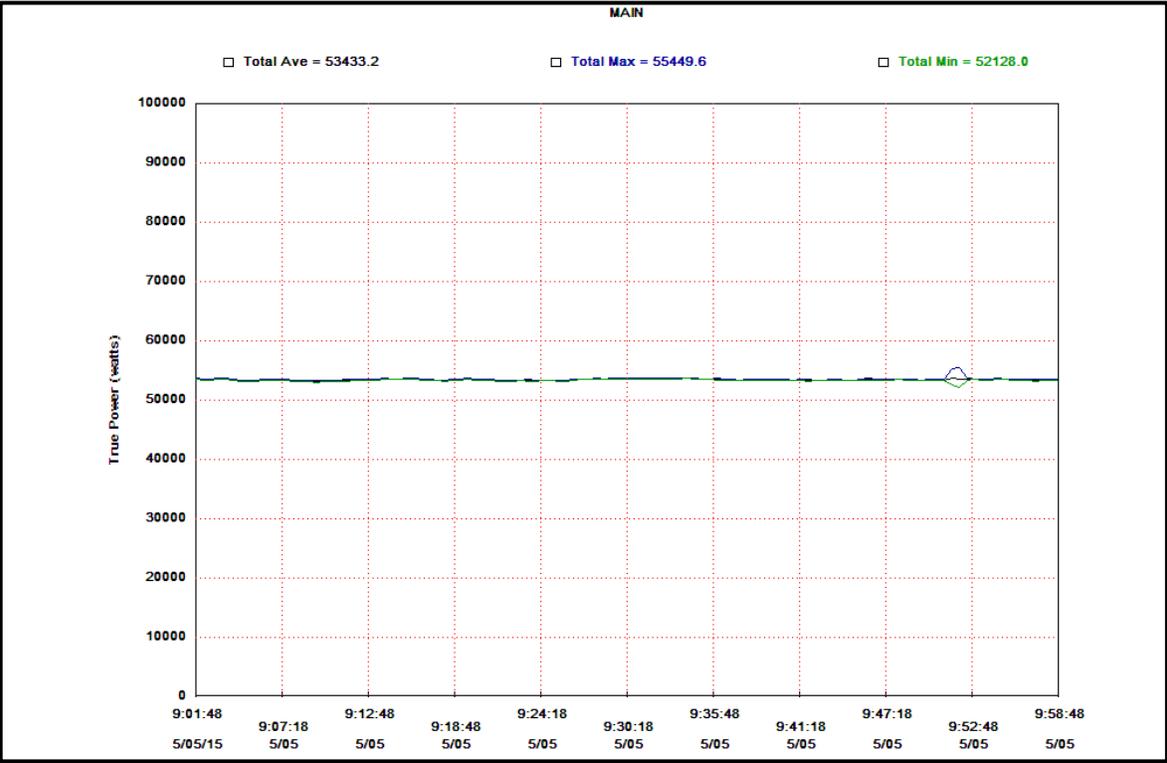


Figura 40 Potencia promedio registrada en periodo de medicion.

### 7.1.3 GRAFICAS DE ENERGIA DE BANCO DE TRANSFORMADORES.

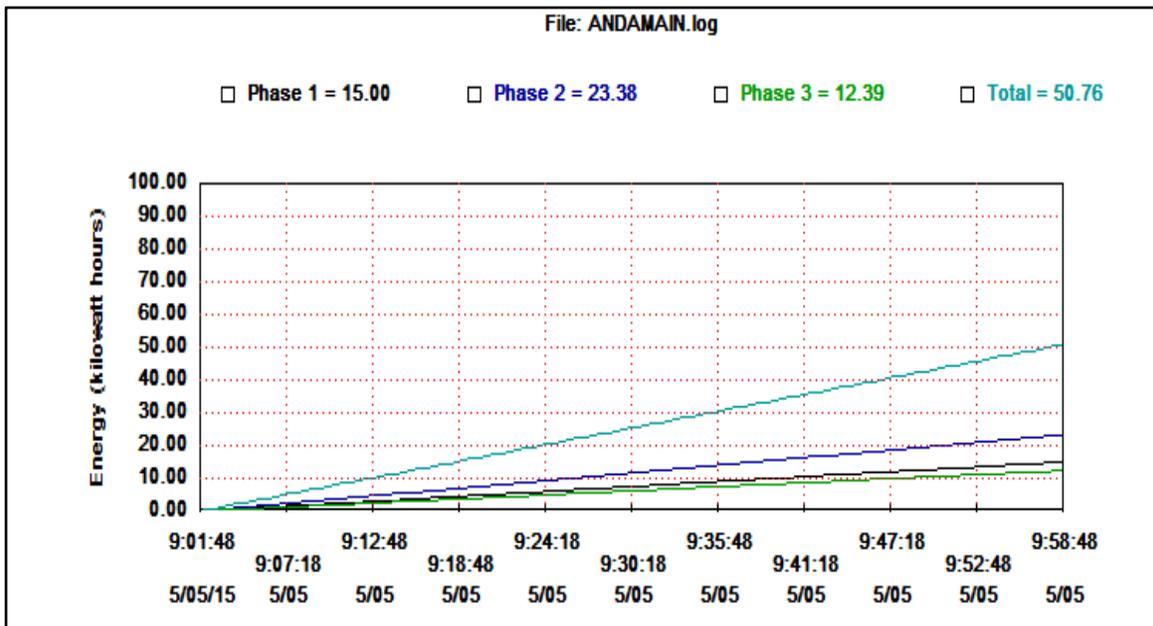


Figura 41 Graficas de energía, tomadas aguas arriba de interruptor.

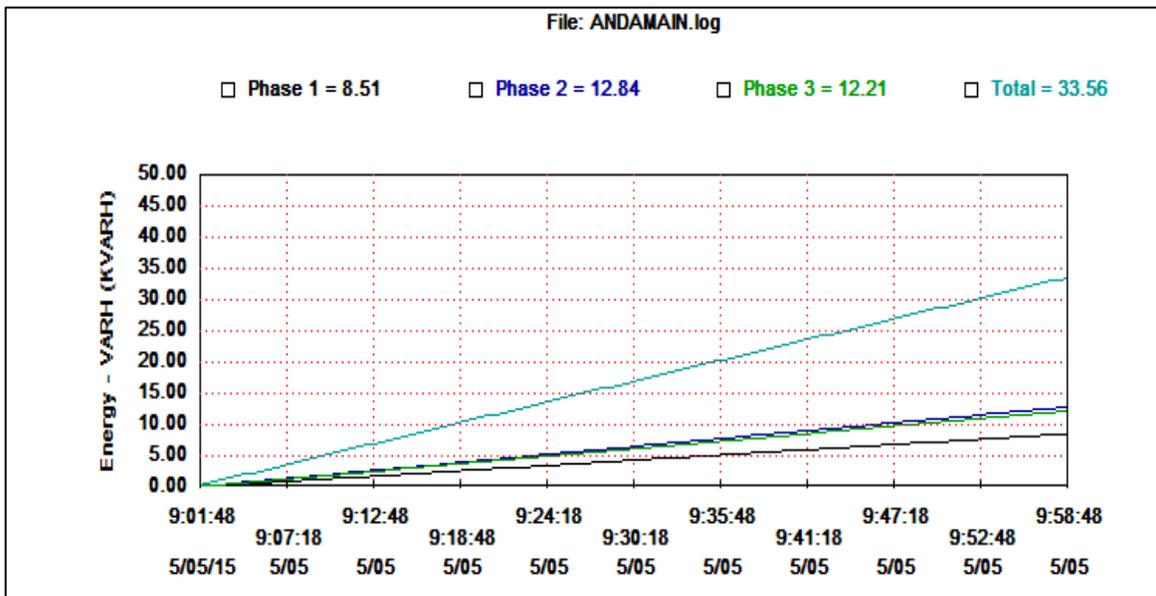
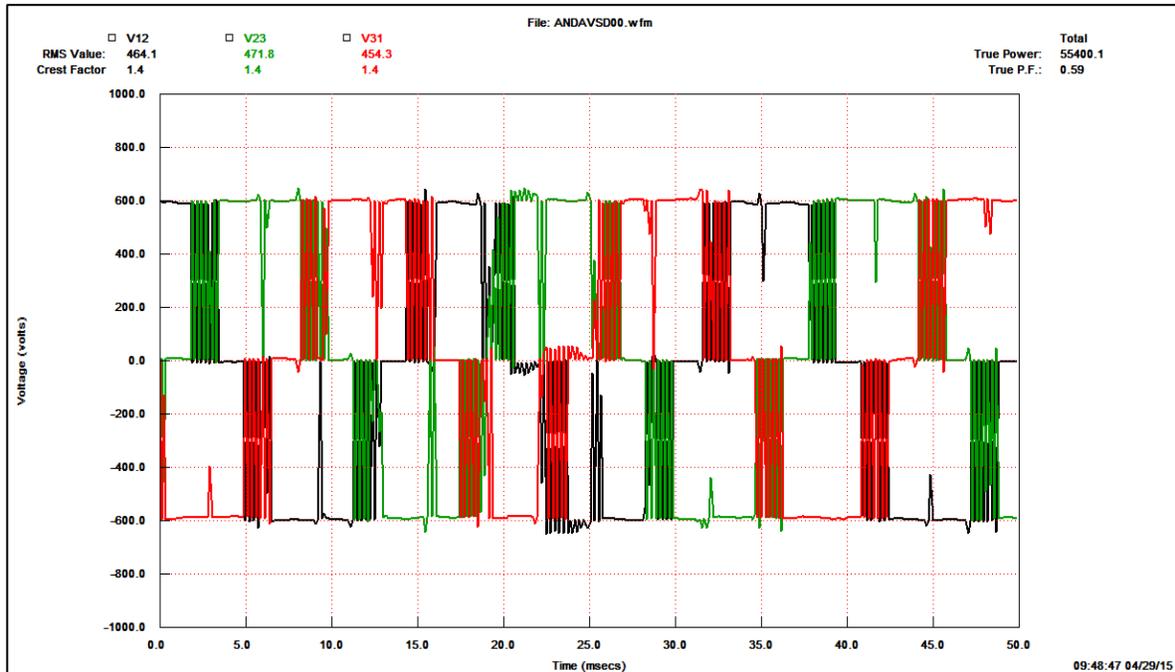


Figura 42 Graficas de energía, tomadas aguas arriba de interruptor.

## 7.2 MEDICIONES A LA SALIDA DEL VARIADOR.

Es muy importante no solo realizar las mediciones en el interruptor principal de la subestación sino también a la salida del variador de velocidad con el propósito de tener un panorama claro sobre si el motor alimentado es capaz de operar con los valores de tensión, corriente y potencia que el equipo electrónico le provee. A continuación veremos las mediciones realizadas a la salida del variador.



*Figura 43 Forma de onda de la tensión a la salida del variador*

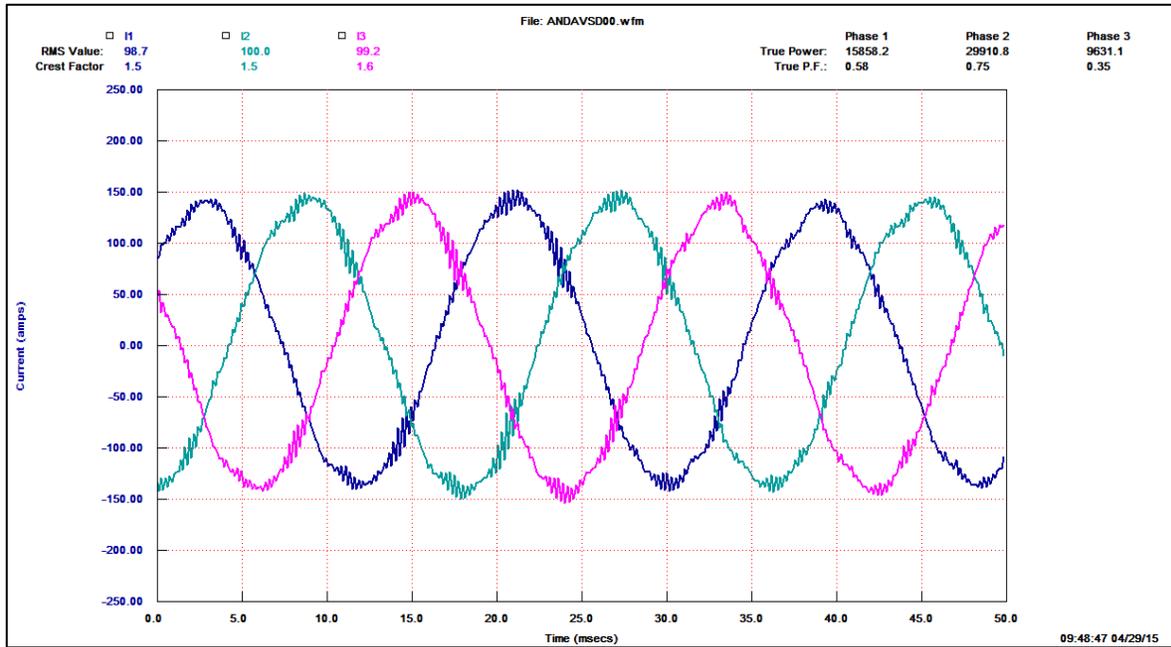


Figura 44 Forma de onda de la corriente a la salida del variador.

Con las formas de onda de las corrientes se observa que son casi senoidales debido a los efectos del variador.

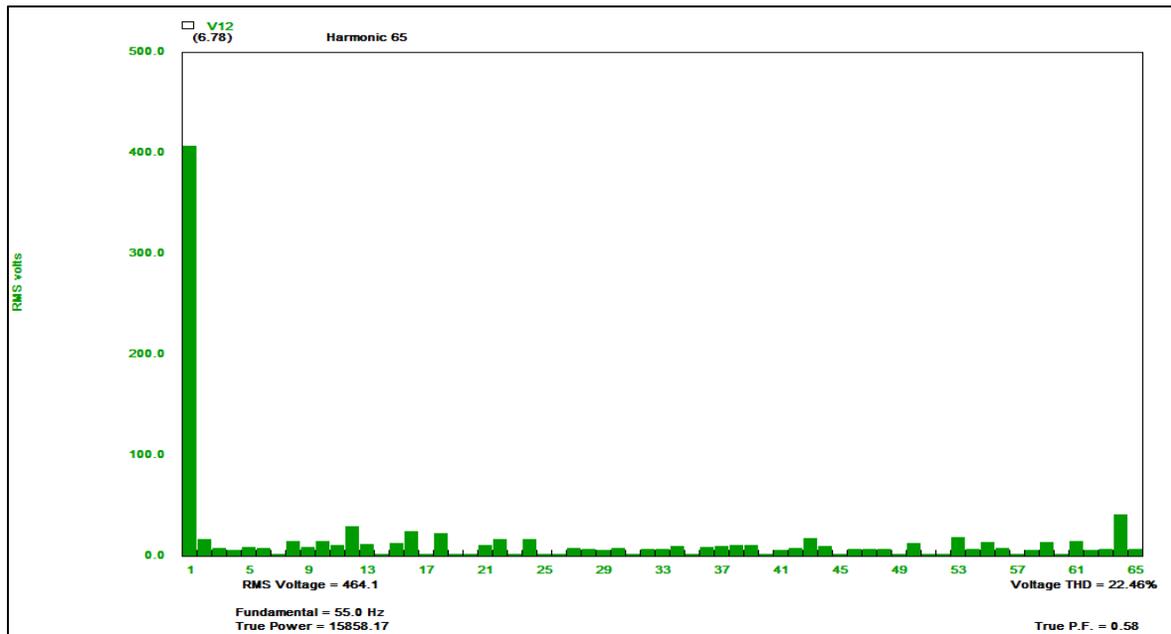


Figura 45 Graficas de la distorsión armónica de voltaje a la salida del variador.

### 7.2.1 GRAFICAS DE ENERGIA (kWh) DEL VARIADOR.

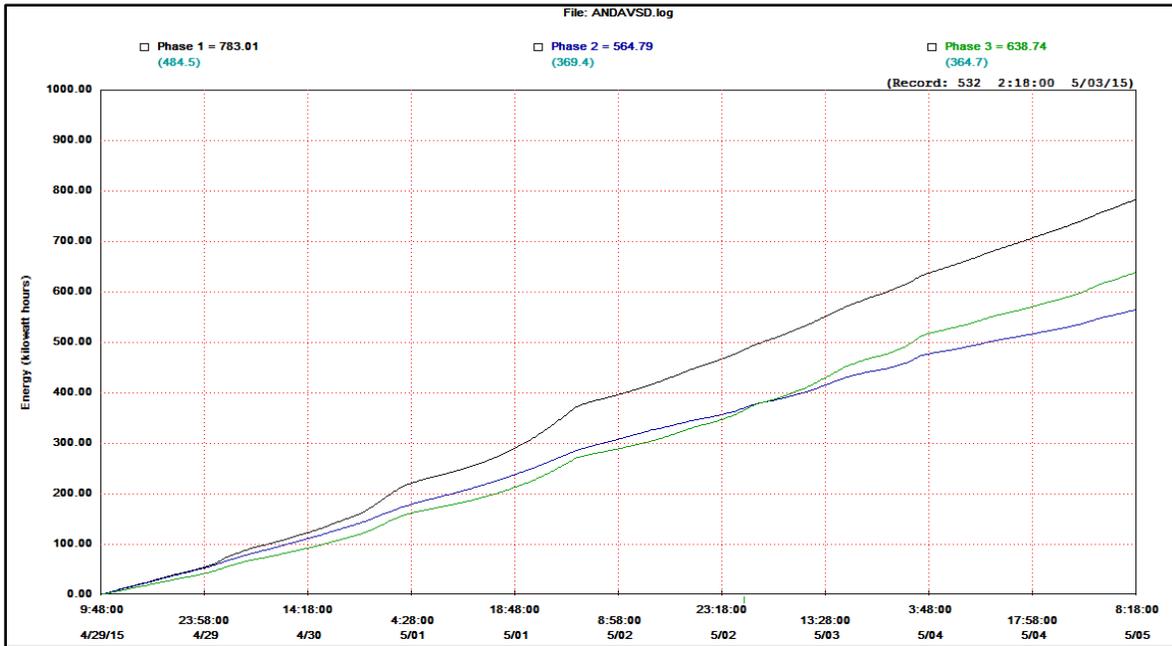


Figura 46 Graficas de energia kWh a la salida del variador.

### 7.2.2 GRAFICAS DE ENERGIA (VARH) DEL VARIADOR.

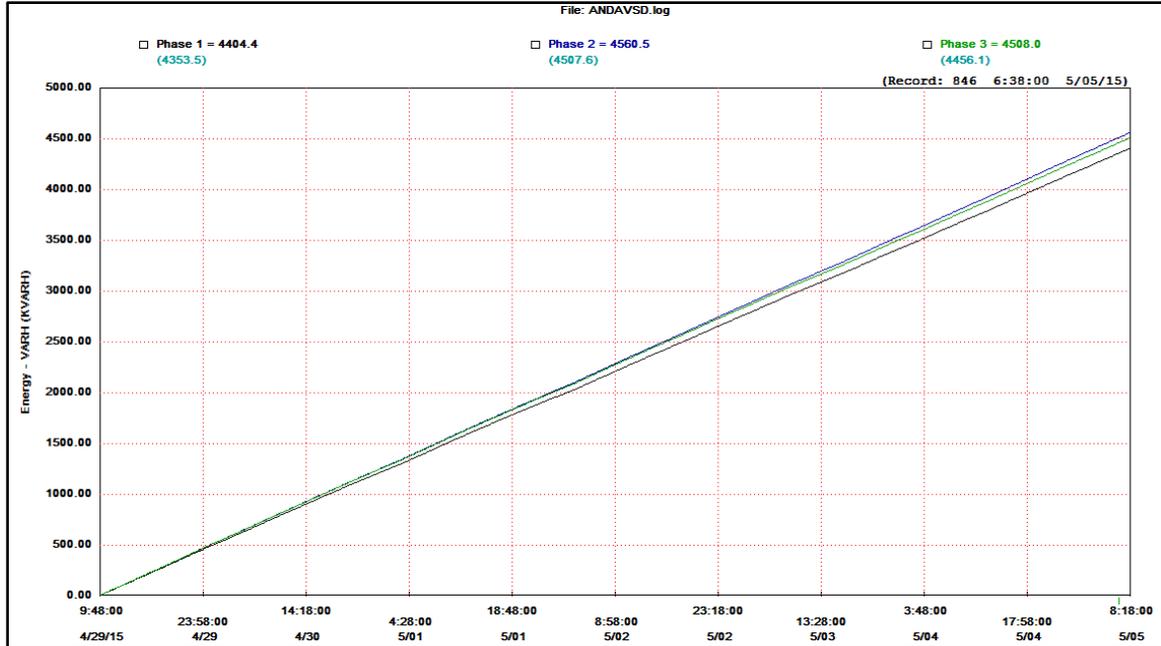


Figura 47 Graficas de energía VARH tomadas a la salida del variador

### 7.2.3 GRAFICAS DE ENERGIA (kWh) POR FASE DEL VARIADOR.

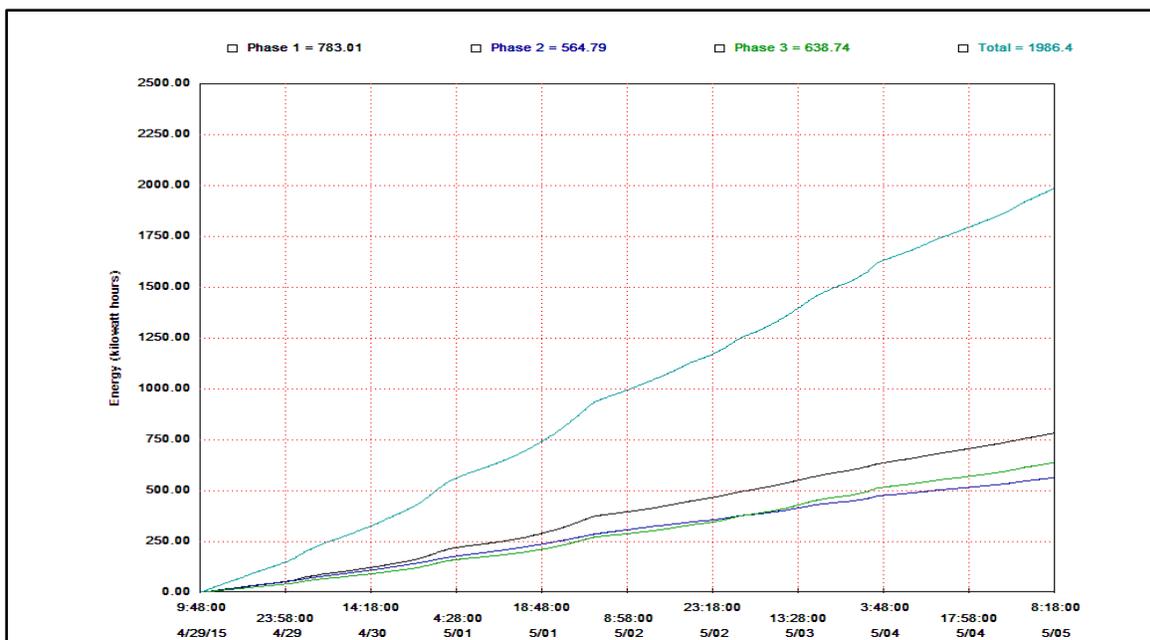


Figura 48 Energía en kWh por fases y total, durante el periodo de medición.

### 7.2.4 GRAFICAS DE POTENCIA ACTIVA PROMEDIO VARIADOR.

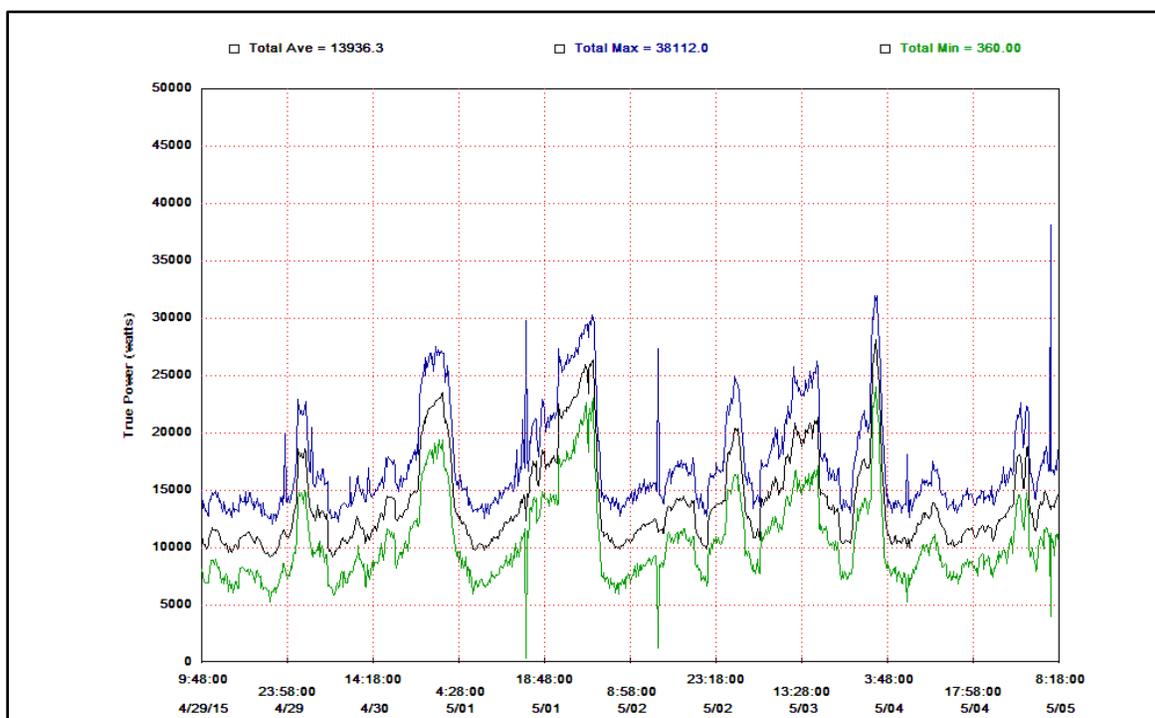


Figura 49 Potencia activa promedio, máxima y mínima durante el periodo de medición.

## 7.2.5 GRAFICAS DE POTENCIA APARENTE PROMEDIO VARIADOR.

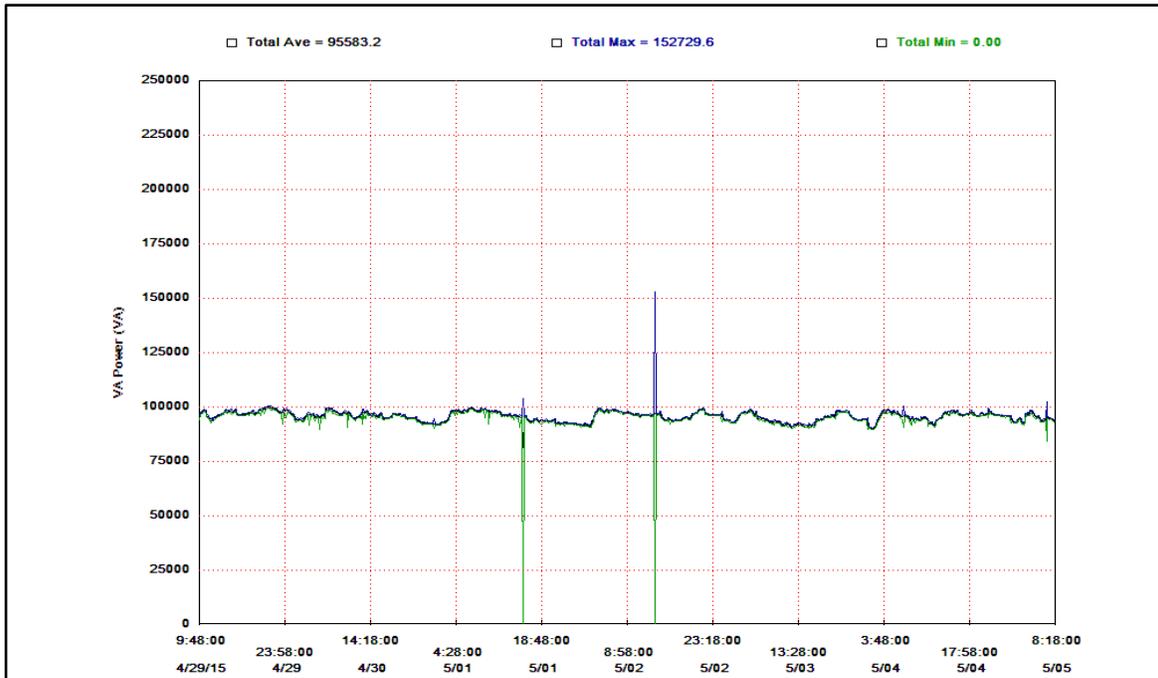


Figura 50 Potencia aparente promedio, máxima y mínima durante el periodo de medición.

## 7.2.6 GRAFICAS DE FRECUENCIA DE VOLTAJE PROMEDIO DEL INVERSOR.



Figura 51 Registro de frecuencia de voltaje de salida del inversor, mínimo, máximo y promedio, durante el periodo de medición.

# CAPITULO 4.

## ANALISIS Y SELECCIÓN DE EQUIPO PARA ESTACION DE BOMBEO “LA SULTANA”, COSTOS DE OPERACIÓN Y AHORRO.

---

### 1 ANALISIS Y SELECCIÓN DE EQUIPO.

Posteriormente del estudio de las condiciones actuales de la estación de bombeo La Sultana, se enumeran ciertas condiciones con el propósito de obtener el mayor ahorro posible en cuanto al consumo de energía.

#### 1.1 CONDICIONES ACTUALES, OBSERVACIONES:

- ❖ Una de las partes más vitales de la estación de bombeo es en si la bomba. De las mediciones tanto de caudales instantáneos como de presiones podemos determinar que la bomba idealmente debería estar produciendo 400 GPM, pero en la práctica está entregando 320 GPM como máxima producción, lo que nos indica que es deseable hacer una selección de una nueva bomba.
- ❖ Como se estudió en el capítulo 3, el motor eléctrico se encuentra sub-utilizado, actualmente se cuenta con un motor de 150 HP con una cargabilidad promedio de 51% y un factor de corriente de carga 53%, lo que nos indica que, este motor no es el que se destinó en su diseño original para la estación de bombeo. Por tanto para una mejora en el diseño es necesario recalcular para las nuevas condiciones propuestas el motor adecuado para el funcionamiento con el variador.
- ❖ Un paso importante luego de reemplazar tanto la bomba y el motor es una reprogramación del variador. De ahí se desprende la necesidad de hacer un reajuste de las configuraciones del variador en el entendido de que la potencia del motor habrá cambiado, por ser un motor con características inverter duty que será capaz de soportar una mayor variación en cuanto al aumento o disminución de la frecuencia, entre otras características.
- ❖ En cuanto a las instalaciones eléctricas uno de los detalles a resaltar es el hecho de que se deben de mejorar para ofrecer una mejor calidad en el servicio eléctrico así como una mayor seguridad eléctrica en los diferentes circuitos que se encuentran en las instalaciones de la planta de bombeo.

## 2 PROPUESTA DE SELECCIÓN DE LA NUEVA BOMBA.

En el capítulo tres vimos las condiciones actuales de la bomba instalada. El diseño original estipula de acuerdo a datos de ANDA que la bomba debe de ser capaz de levantar una presión de 720 ft y un caudal de 400 GPM. A continuación mostramos los datos de diseño:

"LA SULTANA"	
Turbina	
Marca	National Pump
Modelo	M10LC
Numero de etapas	12
Caudal (GPM)	400
Carga (pies)	720

*Tabla 18 Datos técnicos actuales de la bomba instalada en el plantel LA SULTANA.*

De acuerdo a las mediciones de caudales instantáneos y presiones a cada hora en el periodo del 29 de abril de 2015 al 5 de mayo de 2015 se obtuvo una variación promedio que nos indica un caudal máximo y mínimo que ronda entre los 20L/s como máximo y de 14L/s como mínimo. En base a lo anterior una posible selección de la bomba siempre de la marca NATIONAL PUMP sería la bomba L10HC, a continuación se muestran los datos técnicos de dicha bomba.

Para hacer un recalcu de las etapas de la nueva bomba, tomamos como base las curvas mostradas en la figura 52 y trazamos los datos promedio tanto máximo como mínimo de los caudales medidos en el periodo antes mencionado:

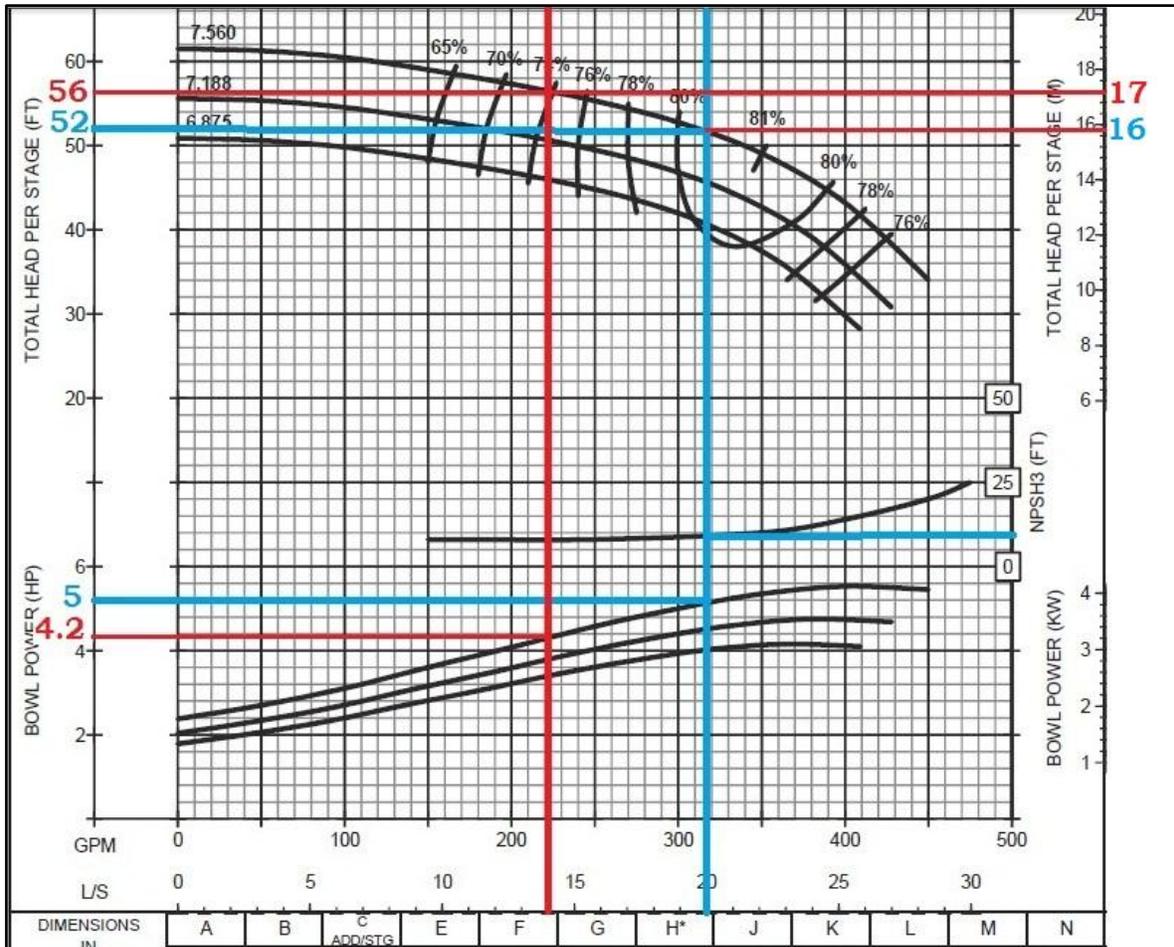


Figura 52 Marcado de los caudales mínimos y máximos para el cálculo del número de etapas.

Podemos hacer dos cálculos ya sea a 20 L/s o a 14 L/s, a continuación mostramos ambos, recalcamos que la carga dinámica total del sistema: 720 pies de agua:

$$No. de etapas = \frac{carga \text{ en pies de agua}}{presion} = \frac{720}{52} = 13.8461 \cong 14 \text{ etapas} \quad (47)$$

Este valor corresponde a un caudal de 320 GPM y una eficiencia de n=81%

$$No. de etapas = \frac{carga \text{ en pies de agua}}{presion} = \frac{720}{56} = 12.8571 \cong 13 \text{ etapas}$$

Este valor corresponde a un caudal de 220 GPM y una eficiencia de  $n=72\%$

De acuerdo a los cálculos anteriores el número de etapas para el nuevo diseño de la bomba sería de 14 etapas en contraste con el diseño actual que consta de 12 etapas y cuyos cálculos se muestran a continuación, siempre manejando una carga dinámica total del sistema de 720 ft de agua:

$$\text{No. de etapas} = \frac{\text{carga en pies de agua}}{\text{presion}} = \frac{720}{60} = 12 \text{ etapas}$$

La presión por etapa es de 60 ft con un caudal máximo de 400 GPM a una eficiencia  $n=78\%$ .

### 3 CALCULO DE HP DE MOTOR A PARTIR DE BHP.

Antes de pasar a los cálculos y por ende la determinación de la capacidad del motor que necesita la bomba para una operación exitosa, debemos definir dos términos bajo los cuales está sustentado el cálculo mostrado.

El rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga incluye tres factores básicos:

- ❖ La capacidad, expresada en unidad de volumen por unidad de tiempo, como GPM.
- ❖ la carga total, expresada en pies del líquido que se bombea.
- ❖ la velocidad a la cual funciona la bomba en RPM.

El rendimiento o “comportamiento” de la bomba se presenta en forma de curvas (figura 54) en que la curva de carga contra capacidad se traza a una velocidad fija. La curva también indica el caballaje al freno requerido con diversos flujos y la eficiencia correspondiente de la bomba. La capacidad a la cual la bomba trabaja con más eficiencia se llama punto de máxima eficiencia (denominado a veces en inglés con las siglas b.e.p., best efficiency point).

El trabajo útil que hace la bomba es el peso del líquido bombeado en un periodo, multiplicado por la carga producida por la bomba y se expresa en términos de caballaje, llamados caballos de agua (*WHP*). Sería más correcto llamar a *WHP* caballos de líquido, que se determinan mediante la siguiente expresión:

$$WHP = \frac{QH(SP.GR)}{3960} \quad (48)$$

En donde:  $WHP$  = caballos de agua,  $Q$  = capacidad de la bomba en gpm y  $H$  = carga total en ft. La potencia requerida para la propulsión de la bomba son los caballos de agua divididos entre la eficiencia  $\eta$  de la bomba: Por tanto, al dividir la ecuación entre esta  $\eta$  se tiene:

$$BHP = \frac{QH(SP.GR)}{3960\eta} \quad (49)$$

Una vez calculado la cantidad de etapas que poseerá la bomba obtenemos los BHP estimados para el dimensionamiento del motor, multiplicando los BHP de una etapa, leídos directamente de la curva nominal de la bomba, por el total de etapas calculadas:

Para el caso: 5 BHP (para 1 etapa) y un total de 14 etapas.

$$Torque = \frac{BHP}{RPM} * 5250 \quad (50)$$

$$Torque = \frac{(5 * 14)}{1800} * 5250$$

$$Torque = 204.17$$

$$HP = \frac{Torque * RPM}{5250} \quad (51)$$

$$HP = \frac{204.17 * 1800}{5250}$$

$$HP = 70$$

#### 4 PROPUESTAS DE MOTOR VS. MOTOR ACTUAL

A continuación se presenta una tabla resumen con la información necesaria para establecer una comparación de diversos parámetros entre el motor que actualmente se encuentra funcionando en la estación de bombeo y de tres propuestas de fabricantes de motores.

Motor Eléctrico	Actual	Propuesta # 1	Propuesta #2	Propuesta # 3
Potencia (HP)	150	75	75	75
Velocidad (RPM)	1780	1780	1780	1780
Voltaje (voltios)	460	460	460	460
Corriente (amperios)	179	92	85.9	87
Tipo	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Aislamiento	F	H	F	F
Factor de servicio	1.15	1.15	1.15	1.15
Eficiencia	93.6%	95.4%	95.4%	95.0%
Frame	L444TP16	L365TP16	365HP	365TP
Marca	General Electric	General Electric	Baldor	US
Precio		\$ 11,587.00	\$ 15,611.00	\$ 12,312.00

*Tabla 19 Parámetros de motor eléctrico que actualmente opera y tres motores propuestos.*

#### 5 CÁLCULO DE POTENCIA.

A continuación mostramos los cálculos de la potencia de entrada en base a los BHP en tres casos distintos, el ideal que serían las condiciones bajo las cuales fue realizado el diseño de la estación de bombeo "LA SULTANA", el real que es producto de las distintas mediciones que se realizaron en el plantel y la propuesta que se está realizando en base a la nueva bomba que se ha seleccionado. Cabe resaltar que todos los cálculos se realizaron a una carga de 720 ft.

$$BHP = \frac{H*Q*Sp.Gr.}{3960*Eff.} \quad (52)$$

$$HP_{entrada} = \frac{BHP}{Motor\ Eff.}$$

$$kW_{entrada} = HP_{entrada} * 0.746$$

5.1 CONDICIONES DE DISEÑO, BOMBA M10LC.

$$BHP = \frac{720 * 400 * 1}{3960 * 0.78}$$

$$BHP = 93.24$$

$$HP_{entrada} = \frac{93.24}{0.936}$$

$$HP_{entrada} = 99.61$$

$$kW_{entrada} = 99.61 * 0.746$$

$$kW_{entrada} = 74.31$$

5.2 CONDICIONES REALES, BOMBA M10LC.

$$BHP = \frac{720 * 320 * 1}{3960 * 0.75}$$

$$BHP = 77.57$$

$$HP_{entrada} = \frac{77.57}{0.936}$$

$$HP_{entrada} = 82.88$$

$$kW_{entrada} = 82.88 * 0.746$$

$$kW_{entrada} = 61.82$$

5.3 CONDICIONES PROPUESTAS, BOMBA L10HC.

$$BHP = \frac{720 * 320 * 1}{3960 * 0.81}$$

$$BHP = 71.82$$

$$HP_{entrada} = \frac{71.82}{0.954} = 75.29$$

$$kW_{entrada} = 75.29 * 0.746$$

$$kW_{entrada} = 56.16$$

### 5.3.1 RESUMEN DE CADA UNA DE LAS CONDICIONES CALCULADAS.

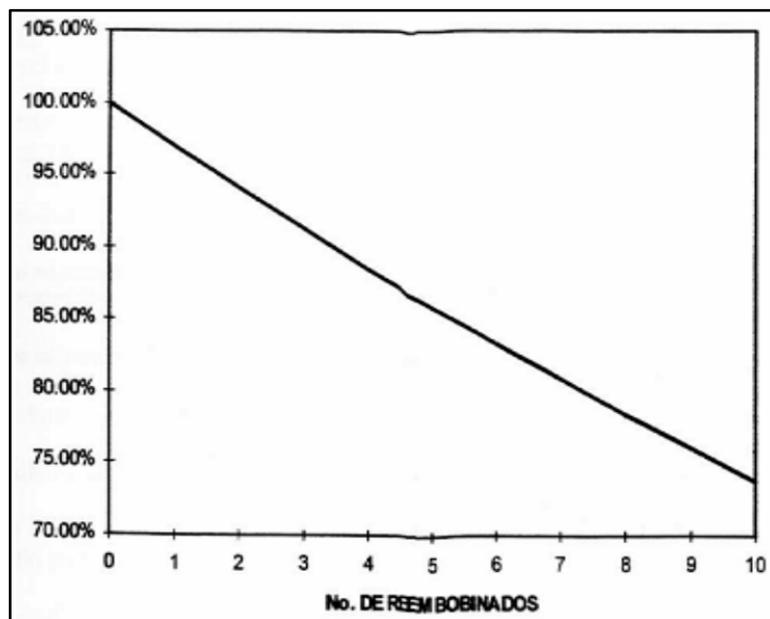
En la siguiente tabla se muestra un resumen de las tres condiciones calculadas para la estación de bombeo "LA SULTANA". Cabe resaltar que entre las comparaciones que podemos hacer la más es en cuanto al consumo en KW entre el consumo actual y el consumo esperado en el nuevo diseño ya que habría una reducción en 5.66 kW.

	DISEÑO	ACTUAL	PROPUESTA
H	720	720	720
Q	400	320	320
Bomba Eff.	0.78	0.75	0.81
Motor Eff.	0.936	0.936	0.954
BHP	93.24	77.57	71.82
HP(entrada)	99.61	82.88	75.29
kW(entrada)	74.31	61.82	56.16

*Tabla 20 Resumen de las distintas condiciones analizadas para la estación de bombeo "LA SULTANA".*

## 6 NUEVA EFICIENCIA PARA EL MOTOR ACTUAL A PARTIR DEL FACTOR REBOBINADO.

Siempre que un motor se rebobina, aunque se realice en un taller de calidad, se produce una disminución en la eficiencia del motor, ya que sus elementos se ven sometidos a sobre calentamiento, golpes, sobre-esfuerzos mecánicos, mala calidad de las refacciones, etc. Se puede asegurar que cuando un motor se repara en un taller adecuado, su eficiencia disminuye hasta el 2%, mientras que si se realiza en un taller de mala calidad, puede disminuir hasta un 6%, sin embargo, es común que se considere un 1.5% de disminución de eficiencia por cada rebobinado realizado al motor.



*Figura 53 Reducción de la eficiencia por cada rebobinado en el motor. Fuente: Fideicomiso Para el Ahorro de Energía Eléctrica. FIDE.*

Tomando el dato de 4.1% de reducción de eficiencia por cada rebobinado a partir de estudios previos en el país [1], para 3 rebobinados tenemos:

Eff. Nominal	93.6%
Reducción por c/rebobinado	4.1%
Cantidad de rebobinados	3
Total reducción	12.3%
Eff. Reducida por factor rebobinado	82.1%

*Tabla 21 Cálculo de nueva eficiencia estimada a partir de factor rebobinado.*

## 7 CALCULOS DE COSTOS DE OPERACIÓN ANUAL.

Formula del cálculo costo de operación.

$$\Delta\$ = 0.746 * HP * L * N * C * \frac{1}{E} \quad (53)$$

HP: potencia de salida del motor.

L: % de carga del motor

N: número de horas de operación

C: costo de la energía

E: eficiencia del motor al % de carga

A partir de la cantidad de horas por día y las distintas franjas horarias se calculan las horas mensuales y luego al año.

	Horas-Día	Horas-Mes	Horas-Año
Punta: de las 18:00 a 22:59 horas	5	150	1800
Resto: de las 05:00 a 17:59 horas	13	390	4680
Valle: de las 23:00 a 04:59 horas	6	180	2160
	24	720	8640

*Tabla 22 Estimación de horas de trabajo por franja horaria, día, mes y año.*

Del pliego tarifario vigente a partir del 15 de abril de 2015 tomamos valores de precio de energía para las diferentes franjas horarias de la categoría gran demanda para la empresa distribuidora DEL SUR.

	GRAN DEMANDA
	MTMH
COMERCIALIZACION US\$/Usuario-Mes	14.809779
PUNTA US\$/kWh	0.128656
RESTO US\$/kWh	0.127607
VALLE US\$/kWh	0.126822
CARGO POR DISTRIBUCION US\$/kW-Mes	6.939401

*Tabla 23 Precios de energía y costos fijos de pliego tarifario vigente, distribuidora DELSUR.*

Con los datos:

	Potencia (HP)	Eff.	Load
Motor Actual	150	0.821	0.510

Calculando para el motor actual con una cargabilidad de 51% tenemos:

	GRAN DEMANDA
	MTMH
Punta	16100.055399
Resto	41518.836277
Valle	19044.657621
Costo Operación	\$ 76,663.55

*Tabla 24 Costos de operacion motor actual*

Para este cálculo se realizó conservando la misma potencia de 150 HP y la misma cargabilidad de 51%, siendo una cargabilidad baja.

Propuesta del motor de 75hp.

Con los datos:

Potencia (HP)	Eff.	Load
75	0.954	0.75

Calculando para el motor actual con una cargabilidad de 75% tenemos:

	GRAN DEMANDA
	MTMH
Punta	10186.27811
Resto	26268.38249
Valle	12049.28643
Costo Operación	\$ 48,503.95

*Tabla 25 Costos de operación estimados para el motor propuesto.*

Este cálculo se realizó reemplazando el motor de una potencia de 150 HP a una de 75 HP y con una cargabilidad asumida de 75%, que es donde presentan una menor cantidad de pérdidas. Para la estimación del costo de operación solo se tomara en cuenta el consumo de energía en las distintas franjas horarias (punta, resto y valle), los cargos de comercialización y distribución quedan excluidos del análisis.

## 8 CALCULO DE AHORRO.

A partir de la cantidad de horas por día y las distintas franjas horarias se calculan las horas mensuales y luego horas al año.

	Horas-Día	Horas-Mes	Horas-Año
Punta: de las 18:00 a 22:59 horas	5	150	1800
Resto: de las 05:00 a 17:59 horas	13	390	4680
Valle: de las 23:00 a 04:59 horas	6	180	2160
	24	720	8640

Del pliego tarifario vigente a partir del 15 de abril de 2015 se toman los valores de precio de energía para las diferentes franjas horarias de la categoría gran demanda para la empresa distribuidora de energía DELSUR.

	GRAN DEMANDA
	MTMH
COMERCIALIZACION US\$/Usuario-Mes	14.809779
PUNTA US\$/kWh	0.128656
RESTO US\$/kWh	0.127607
VALLE US\$/kWh	0.126822
CARGO POR DISTRIBUCION US\$/kW-Mes	6.939401

Con los datos:

	Potencia (HP)	Eff.	Load
Motor Actual	150	0.821	0.51
Motor Propuesto	75	0.954	0.75

Se estiman los diferentes consumos para ambos motores, el actual y el propuesto, la diferencia de los consumos nos representa el ahorro.

CONSUMO	Año	Mes
Motor 150 HP	\$ 76,663.55	\$ 6,388.63
Motor 75 HP	\$ 48,503.95	\$ 4,042.00
AHORRO	\$ 28,159.60	\$ 2,346.63

*Tabla 26 Ahorro estimado a partir del consumo de motor actual y motor propuesto.*

Calculando el tiempo de recuperación a partir del ahorro y precios actuales de motor considerado para reemplazo.

Motor Eléctrico	Opción # 1	Opción #2	Opción # 3
Potencia (HP)	75	75	75
Marca	General Electric	Baldor	US
Precio	\$ 11,587.00	\$ 15,611.00	\$ 12,312.00
RS (Meses)	5	8	5

*Tabla 27 Estimacion de tiempo de recuperacion con reemplazo de motor electrico al propuesto.*

Con el ahorro estimado al año de \$ 28,150.60, vemos que para el motor con un precio más costoso, el tiempo de recuperación es de 8 meses aproximadamente.

## 9 EFICIENCIA DEL SISTEMA.

Sabemos que la eficiencia del sistema (conjunto motor + bomba) es el producto de la eficiencias, teniendo en cuenta lo anterior presentamos cuatro casos para la eficiencia del sistema con el propósito de mostrar como mejora la eficiencia en base a un reemplazo del motor más la bomba y sus diferentes casos.

### 9.1 PRIMER CASO.

Condiciones actuales motor 150 HP y bomba actual M10LC.

	Eff.
Motor 150 HP	0.821
Bomba M10LC	0.700
Eff. Sistema	0.575

*Tabla 28 Eficiencia del sistema esperada, primer caso.*

### 9.2 SEGUNDO CASO.

Conservando el mismo motor de 150 HP y cambio de bomba L10HC.

	Eff.
Motor 150 HP	0.821
Bomba L10HC	0.800
Eff. Sistema	0.657

*Tabla 29 Eficiencia del sistema esperada, segundo caso.*

### 9.3 TERCER CASO.

Cambio de motor 75 HP 'inverter duty' y conservando la misma bomba M10LC.

	Eff.
Motor 75 HP	0.954
Bomba M10LC	0.700
Eff. Sistema	0.668

*Tabla 30 Eficiencia del sistema esperada, tercer caso.*

### 9.4 CUARTO CASO.

Cambio de motor 75 HP 'inverter duty' y cambio de bomba L10HC.

	Eff.
Motor 75 HP	0.954
Bomba L10HC	0.800
Eff. Sistema	0.763

*Tabla 31 Eficiencia del sistema esperada, cuarto caso.*

Como esperábamos el mejor resultado es cuando se reemplaza tanto el motor eléctrico como la bomba, logrando una eficiencia del conjunto de 76.3 %.

## 10 DESPLAZAMIENTO PARA EL INCREMENTO DE 1% DE EFICIENCIA.

El punto de máxima eficiencia de la bomba se sitúa a 81% que corresponde a un caudal de 350 GPM, haciendo uso de las ecuaciones de similitud podemos encontrar la velocidad a la que debe de operar la bomba para tener dicha eficiencia.

El variador deberá operar al nuevo motor de inducción a esa velocidad manteniendo la presión constante de 52 ft.

Como condición inicial tendremos una velocidad  $n_1=1770$  rpm, que corresponde a un caudal  $Q_1=320$  GPM. El caudal final que se pretende alcanzar en el sistema será  $Q_2=350$  GPM y por tanto encontraremos la velocidad  $n_2$ .

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (54)$$

$$n_2 = \frac{Q_2 * n_1}{Q_1} = \frac{350 * 1770}{320} = 1936 \text{ rpm}$$



## CONCLUSIONES.

- ❖ El método carga-deslizamiento propuesto por el Std. IEEE 739 sección 6.16 y 6.17 para la determinación de eficiencia en el lugar de trabajo no aplica a motores operados bajo variadores de velocidad cuando la carga del motor está por debajo de lo que pide el Std. para ser considerado como un dato válido.
- ❖ El factor de carga obtenido por medio de la relación corriente medida entre la corriente a plena carga es una manera alternativa para poder determinar la cargabilidad de un motor cuando las condiciones de operación no cumplen con el método de carga-deslizamiento.
- ❖ Se puede determinar la cargabilidad en los motores por medio de la relación de los kilowatts medidos y los datos de placa del motor como la potencia en HP y la eficiencia del mismo.
- ❖ El registro de caudal y presión de la estación de bombeo LA SULTANA muestran una baja eficiencia de la bomba, ya que de acuerdo al caudal instantáneo, opera a una eficiencia de 73% en promedio, el cual es deficiente ya que en el diseño original, la bomba se especificó para un punto de operación al 79% de eficiencia.
- ❖ El conjunto motor-bomba que operan actualmente en la estación de bombeo poseen una baja eficiencia, esto se ve reflejado directamente en el costo de operación del motor.
- ❖ Según los datos obtenidos podemos argumentar que el motor instalado actualmente en la estación de bombeo se encuentra sobredimensionado, ya que aproximadamente el sistema utiliza apenas 66 HP de los 150 HP nominales, se asume que el motor del diseño original era de 75 HP y fue reemplazado por el actual en una emergencia.
- ❖ La mejora de la eficiencia del sistema es de 18.8% en comparación con la eficiencia actual que se estima con un valor de 57.5%, resultando una eficiencia mejorada del conjunto motor-bomba de 76.3% según lo planteado en el capítulo 4, sección 9.4.

- ❖ Con un ahorro anual estimado de \$ 28,150.60 es posible reemplazar el motor eléctrico por uno de las características detalladas en las recomendaciones y obtener como retorno simple la cantidad de 8 meses aproximadamente.
- ❖ De acuerdo a la programación del variador instalado, la forma en que opera el sistema es para asegurar una presión constante la cual es fijada a una velocidad que corresponde a 5% debajo de la velocidad nominal del motor. Por tanto y de acuerdo al comportamiento del sistema se está llevando a operar a una zona de baja eficiencia ocasionando un mayor consumo y por ende el incremento de pérdidas.
- ❖ Evaluando el nuevo equipo propuesto (motor-bomba), podemos determinar que la velocidad mínima de operación a la que la bomba debe de funcionar es a 1,770 rpm garantizando una mayor eficiencia, incrementado el flujo y la presión. Se puede operar el sistema 5% arriba de la frecuencia nominal del motor para garantizar la operación más óptima de todo el sistema.

## RECOMENDACIONES.

- ❖ Realizar el reemplazo del motor existente de 150 HP por uno de diseño 'inverter duty' de capacidad de 75 HP de uno de los fabricantes propuestos, capaz de operar en conjunto con el variador de velocidad ya instalado, así explotar al máximo la tecnología del variador de velocidad Schneider Altivar 61.
- ❖ Realizar el reemplazo de la bomba actual por la bomba propuesta, ya que según el registro de datos de producción de agua, la estación suministra un caudal instantáneo máximo de 320 gpm pero con baja eficiencia, con el reemplazo de la bomba se lograría una mejora de eficiencia considerable.
- ❖ Realizar un ajuste del variador de velocidad Schneider Altivar 61 que se apegue a las características del nuevo motor con una nueva ventana de operación a diferentes frecuencias mínimas y máxima, de ser reemplazado, y especificar la operación a torque cuadrático bajo el cual se clasifican los sistemas de bombeo.
- ❖ Estimar cierta franja horaria para que el motor salga de operación ya que así se prolongara la vida útil de la máquina.
- ❖ Realizar una programación por horas de servicio para el mantenimiento del motor y bomba, así ambas maquinas tendrían una vida de operación óptima.

## GLOSARIO.

**Aislamiento eléctrico:** En el que se impide el paso de la corriente eléctrica.

**Armazón:** Es un código o clave formado por números y letras que definen las dimensiones mecánicas y la posición de montaje del motor.

**Conductividad eléctrica:** Capacidad de un medio o espacio físico de conducir la electricidad.

**Carcasa:** Es la envolvente del núcleo del estator que en el caso de los motores cerrados, lo protege del ambiente y hace funciones de intercambiador de calor con el exterior.

**Clase de aislamiento 130 (Clase B):** Es la que comprende materiales aislantes o combinación de los mismos, que deben ser capaces de soportar la temperatura máxima de 403 K (130°C).

**Clase de aislamiento 155 (Clase F):** Es la que comprende materiales aislantes o combinación de los mismos, que deben ser capaces de soportar la temperatura de 428 K (155°C).

**Clase de aislamiento 180 (Clase H):** Es la que comprende materiales aislantes o combinación de los mismos, que deben ser capaces de soportar la temperatura de 453 K (180°C).

**Corriente de arranque (rotor bloqueado):** Es la corriente que demanda el motor al arrancar, y que corresponde a condiciones de rotor bloqueado o velocidad cero. Aplicando tensión y frecuencia eléctricas nominales.

**Deslizamiento:** Es la diferencia entre la frecuencia de rotación (velocidad) síncrona y de carga plena de un motor de inducción, expresada en por ciento.

**Drene:** Ducto que permite la salida de fluidos.

**Estator:** es una parte fija de una máquina rotativa (motor).

**Entrehierro:** Al espacio de aire existente entre el estator y el rotor se le denomina entrehierro.

**Eficiencia:** Es el cociente entre la potencia mecánica disponible en el eje del motor y la potencia que toma de la línea, ambas expresadas en las mismas unidades, generalmente expresada en por ciento.

$$[\text{Potencia de salida} / \text{potencia de entrada}] \times 100.$$

$$[\text{Potencia de salida} / (\text{potencia de salida} + \text{pérdidas})] \times 100.$$

**Eficiencia nominal:** Es el valor de la eficiencia mostrado en la placa de datos del motor, seleccionado de la columna A de la Tabla 5 por el fabricante. Este valor no debe ser mayor que la eficiencia promedio de una población grande de motores del mismo diseño.

**Eficiencia Premium:** Es la eficiencia de los motores que igualan o superan los valores de la eficiencia de la Tabla 6, de acuerdo a su enclaustramiento y número de polos.

**Factor De Potencia:** Es el cociente entre la potencia activa en watts y la potencia aparente en voltamperes, generalmente se expresa en por ciento.

**Factor de servicio:** Es un factor por el que se multiplica la potencia nominal para conocer la capacidad de sobrecarga que el motor puede soportar sin exceder los límites de elevación de temperatura establecidos, en las tablas 7, 8 y 9, para la operación a carga de factor de servicio para la clase de aislamiento indicada en la placa de datos y construcción del motor.

**Letra de clave:** Es la letra que designa los kVA por kW o cp de un motor a rotor bloqueado, de acuerdo a la Tabla 1, y debe de estar indicada en la placa de datos.

**Letra de diseño:** Es la letra que identifica las características de corriente de arranque, par de arranque, par máximo y par mínimo de un motor.

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Electronicos y Electricistas).

**Motor eléctrico:** Es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de interacciones electromagnéticas.

**Motor abierto:** Es un motor que permite el paso del aire exterior alrededor y a través de sus embobinados, para su enfriamiento.

**Motor de inducción:** Es un motor eléctrico del cual solamente una parte (estator), se conecta a la fuente de energía, la otra (rotor) funciona por inducción electromagnética.

**Motor tipo jaula de ardilla:** Es un motor de inducción cuyo circuito secundario está formado por barras colocadas en ranuras del núcleo secundario, permanentemente cerradas en circuito corto (corto circuito) por medio de anillos en sus extremos, dando una apariencia de una jaula de ardilla.

**Motor totalmente cerrado a prueba de agua:** Es un motor construido en tal forma que el agua en forma de lluvia o chorro, aplicado al mismo, no haga contacto con sus partes internas.

**Motor vertical:** Es aquel cuya posición de instalación debe ser con su eje de rotación perpendicular al plano de montaje.

**MG 1:** Motors and Generators 1 (Motores y Generadores 1).

**NEMA:** National Electrical Manufacturers Association (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos)

**NEC:** Código eléctrico nacional.

**Potencia nominal:** Es la potencia mecánica de salida, indicada en la placa de datos del motor.

**RPM:** Revoluciones por minuto.

**Temperatura ambiente:** Es la temperatura del medio que rodea el motor, generalmente aire y que está en contacto con sus partes externas, enfriándolo.

**Variador de frecuencia ó Variador de velocidad (VFD ó VSD):** Dispositivo electrónico, que permite el control de motores eléctricos.

## BIBLIOGRAFIA.

- ❖ [1] "Evaluación del impacto sobre el parámetro eficiencia eléctrica en motores eléctricos rebobinados de bajo voltaje", Trabajo de graduación de Universidad de El Salvador Noviembre 2009, Manuel de Jesús Quijano Hernández y Nelson Alberto Rivas Niño.
- ❖ [2] "NEMA MG-1 motors and generators" NEMA standars publications 2009.
- ❖ [3] "IEEE std. 739-1995 recommended practice for energy management in industrial and comercial facilities"
- ❖ [4] "IEEE std. 112-2004 standard test procedure for polyphase induction motors and generators"
- ❖ [5] "Metodología para la evaluación energética de motores eléctricos de inducción tipo jaula de ardilla" FIDE.
- ❖ [6] Notas de clase de administración de energía, TEL-115 (Motores Eléctricos y Transformadores), Ing. Armando Martínez Calderón, Universidad de El Salvador.
- ❖ [7] "Términos y condiciones generales al consumidor final, del pliego tarifario del año 2015.", SIGET
- ❖ [8] "Energy Tips: MOTOR SYSTEMS Tip Sheet #14", Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy.
- ❖ [9] "Bombas, selección, uso, y mantenimiento", J. Kenneth
- ❖ [10] "Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM" WEG equipamientos eléctricos S.A
- ❖ [11] "Selección y aplicación de variadores de velocidad" WEG equipamientos eléctricos S.A
- ❖ [12] "Application guide for AC adjustable speed drive systems" NEMA standars publications 2001.
- ❖ [13] "Altivar 61 variable speed drives for synchronous and asynchronous motors programming manual" Schneider electric 2013.
- ❖ [14] "Instalaciones de bombeo, motores, parámetros de funcionamiento y variadores de velocidad" VII curso de formación para personal de mantenimiento y gestores de comunidades regantes.
- ❖ [15] "Guía de implementación ajustes y configuración PID" Schneider Electric 2013.
- ❖ [16] "Energy saver premium efficient VHS" GE Power Conversion.
- ❖ [17] "Holloshaft motors for new DOE standars vertical AC motors, high thrust invertir duty and sine wave optimized Premium efficient" U.S motors.

- ❖ [18] “Baldor Reliance, paquete de información de producto VHECP4316T”  
BALDOR a member of the abb group.

ANEXOS.

Formulario propuesto por sección 6.17 "Realizando una encuesta de motor" Std. IEEE 739.

<b>Induction Motor Test Data Sheet</b>		
Company _____	Plant _____ Date _____	
Building _____	Dept. _____ Application _____	
Motor Shop Number _____	Phase and Hz _____	
Make _____	Frame size _____	
Model/Type _____	Insulation class _____	
Serial number _____	Efficiency rating _____	
Service factor _____	NEMA torque type _____	
Enclosure type _____	Temperature rise _____	
a) Full load HP _____	<b>Calculated Values</b>	
b) Volts _____		
c) Amperes _____		
d) Full load speed _____		
e) Sync. speed _____ 2-pole = 3600, 4-pole = 1800, 6-pole = 1200		
f) Full load slip (e-d) _____		
<b>Measured Values</b>		
g) Average volts _____		n) Running slip (e-k) _____
h) Average amperes _____		p) Percent load (n/f)(100%) _____
j) Average kW _____		q) HP output (a)(p)/(100%) _____
k) Operating speed, rpm _____	r) kW output (q)(0.746) _____	
l) Full load operating hrs. _____	s) Eff. percent (r/j)(100%) _____	
m) Avg. electricity price (\$kWh) _____	t) kVA input (g)(h)(1.732)/(1000) _____	
	u) Power factor (j)/(t)(100%) _____	
	v) kW losses (j-r) _____	
	w) \$/year operation (j)(l)(m) _____	
	x) \$/year losses (v)(l)(m) _____	
	y) <sup>1</sup> Annual energy savings due to changeout with a _____ hp high-efficiency motor (r)(l)(m)(100/s - 100/EFF) _____	
	z) <sup>2</sup> Replacement motor cost _____	
	Simple payback, years (z)/(y) _____	

<sup>1</sup> EFF is the efficiency (%) of a replacement premium motor at the appropriate load factor.  
<sup>2</sup> Cost is the total cost of purchasing and installing an optimally sized, high-efficiency motor.

Figura 54 Formulario para "Encuestas de Motor" de Std. IEEE 739 Sección 6.16 y 6.17.

Product data sheet  
Characteristics

ATV61HC11N4  
SPEEDDRIVE,150HP,460V,ATV61



Main

Range of product	Altivar 61
Product or component type	Variable speed drive
Product specific application	Pumping and ventilation machine
Component name	ATV61
Motor power kW	110 kW 3 phases at 380...480 V
Motor power hp	150 hp 3 phases at 380...480 V
Power supply voltage	380...480 V (- 15...10 %)
Supply number of phases	3 phases
Line current	202 A for 380 V 3 phases 110 kW / 150 hp 168 A for 480 V 3 phases 110 kW / 150 hp
EMC filter	Level 3 EMC filter
Assembly style	With heat sink
Apparent power	133 kVA for 380 V 3 phases 110 kW / 150 hp
Maximum prospective line Isc	35 kA 3 phases
Maximum transient current	258 A for 60 s 3 phases
Nominal switching frequency	2.5 kHz
Switching frequency	2.5...8 kHz with derating factor 2...8 kHz adjustable
Asynchronous motor control	Voltage/Frequency ratio, 2 points Voltage/Frequency ratio, 5 points Flux vector control without sensor, standard Voltage/Frequency ratio - Energy Saving, quadratic U/f
Synchronous motor control profile	Vector control without sensor, standard
Communication port protocol	CANopen Modbus
Type of polarization	No impedance for Modbus
Option card	Profibus DP V1 communication card Profibus DP communication card Multi-pump card Modbus/Uni-Telway communication card Modbus TCP communication card Modbus Plus communication card METASYS N2 communication card LonWorks communication card Interbus-S communication card I/O extension card Fipio communication card Ethernet/IP communication card DeviceNet communication card Controller inside programmable card CC-Link communication card BACnet communication card APOGEE FLN communication card

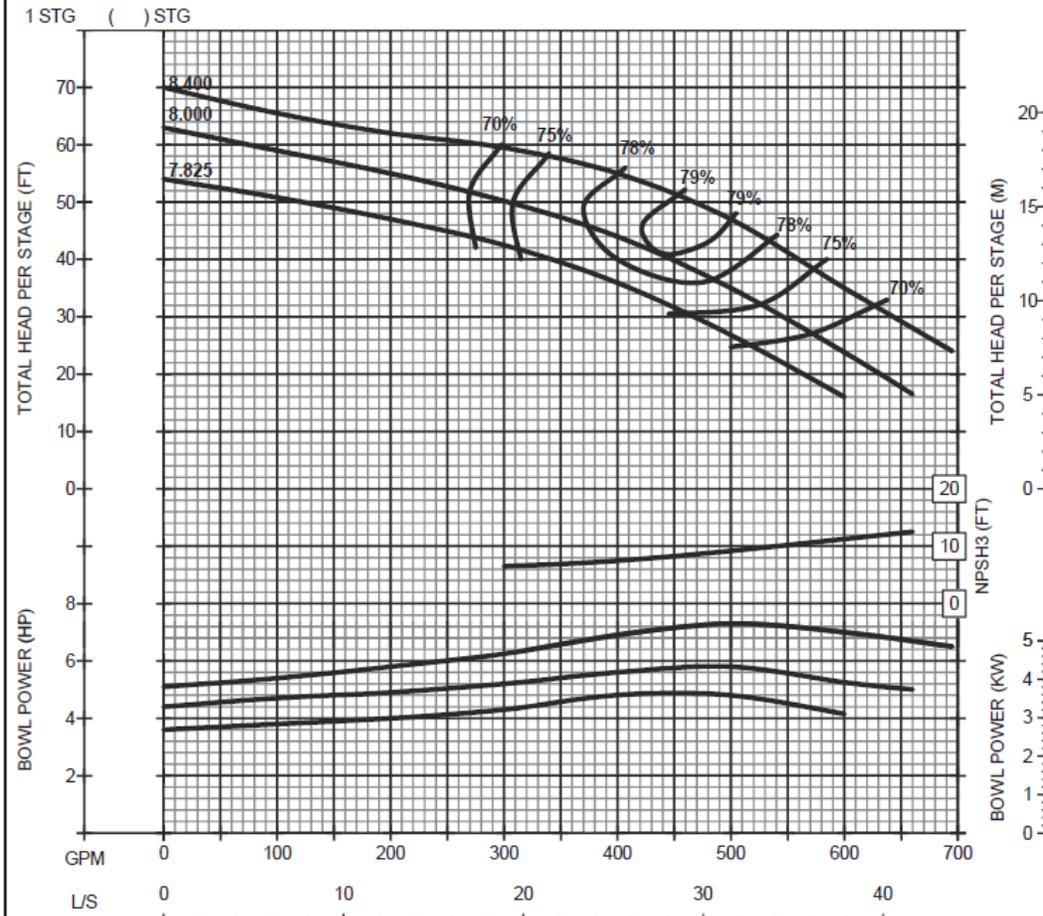
Figura 55 Hoja de datos de variador de velocidad Schneider Altivar 61.

PERFORMANCE BASED ON PUMPING CLEAR, FRESH NON-AERATED WATER AT 85° F MAXIMUM UNLESS OTHERWISE SPECIFIED



**M10LC**  
1770 RPM

CHANGE EFFICIENCY AS FOLLOWS	NUMBER OF STAGES	1	3	5	DESIGN	GPM	TDH	HP	EFF
	NUMBER OF POINTS	-2	-1	0					

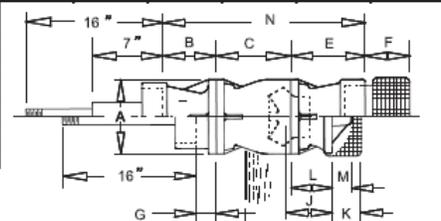


DIMENSIONS IN INCHES	A	B	C ADD/STG	E	F	G	H*	J	K	L	M	N
	10.12	5.19	9.62	10.69	7.56	1.43	10.50	7.50	8.12	7.00	3.19	25.50

**PUMP DATA**

IMPELLER:	ENCLOSED	BOWL CONNECTION:	FLANGED
NO. OF VANES:	5	DISCHARGE SIZE:	6", 8"
THRUST CONSTANT:	5.3	SUCTION SIZE:	6"
LATERAL (STD):	1.0	STD. TUBE:	2.5"
EYE AREA IN <sup>2</sup> :	13.25	WR <sup>2</sup> LB-FT <sup>2</sup> :	0.78
SHAFT DIA:	1.50	1ST STG WT LB:	175
		ADD STG WT LB:	75

\*THIS DIMENSION TO BE USED WITH NPSH3. PUMP INSTALLATION AND SYSTEM MUST SATISFY BOTH VALUES.  
PERFORMANCE BASED ON CAST IRON ENAMELED BOWLS AND BRONZE IMPELLER UNLESS OTHERWISE SPECIFIED.



\* MIN. SUBMERGENCE 07/01/2012 CVM10LC4P8CY

CURVE TEMPLATE 08.05.2011

Figura 56 Hoja de datos de bomba M10LC de National Pump

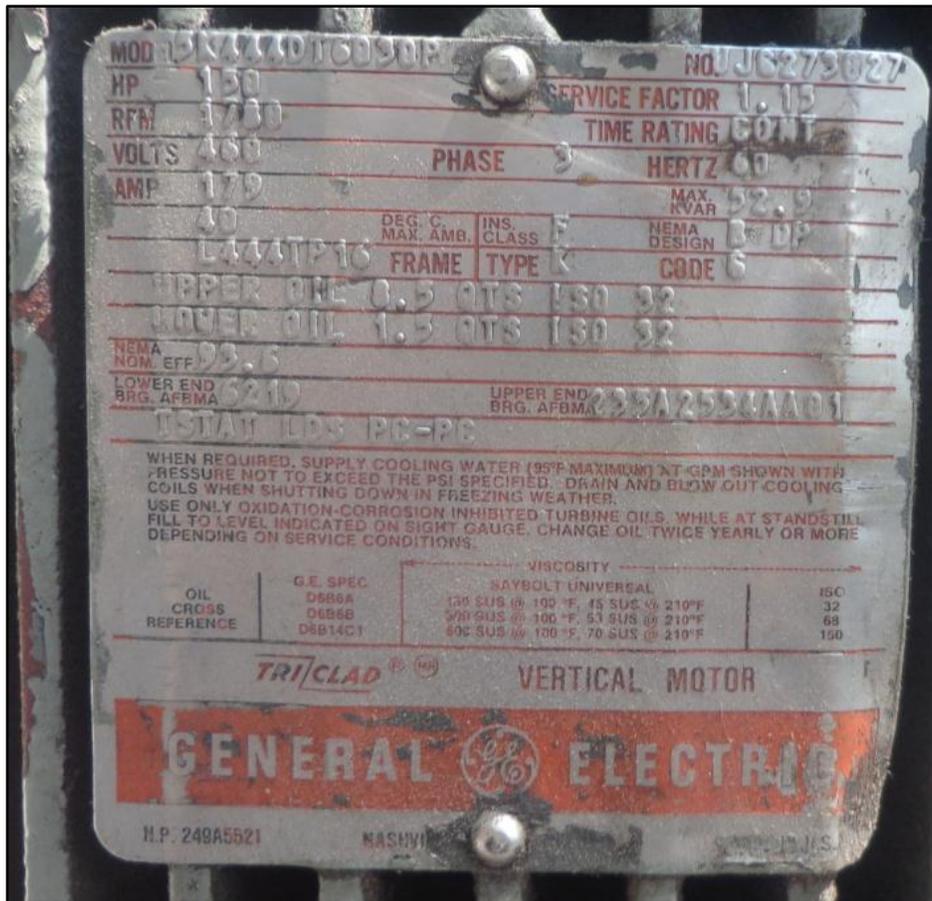


Figura 57 Datos de placa de motor electrico.

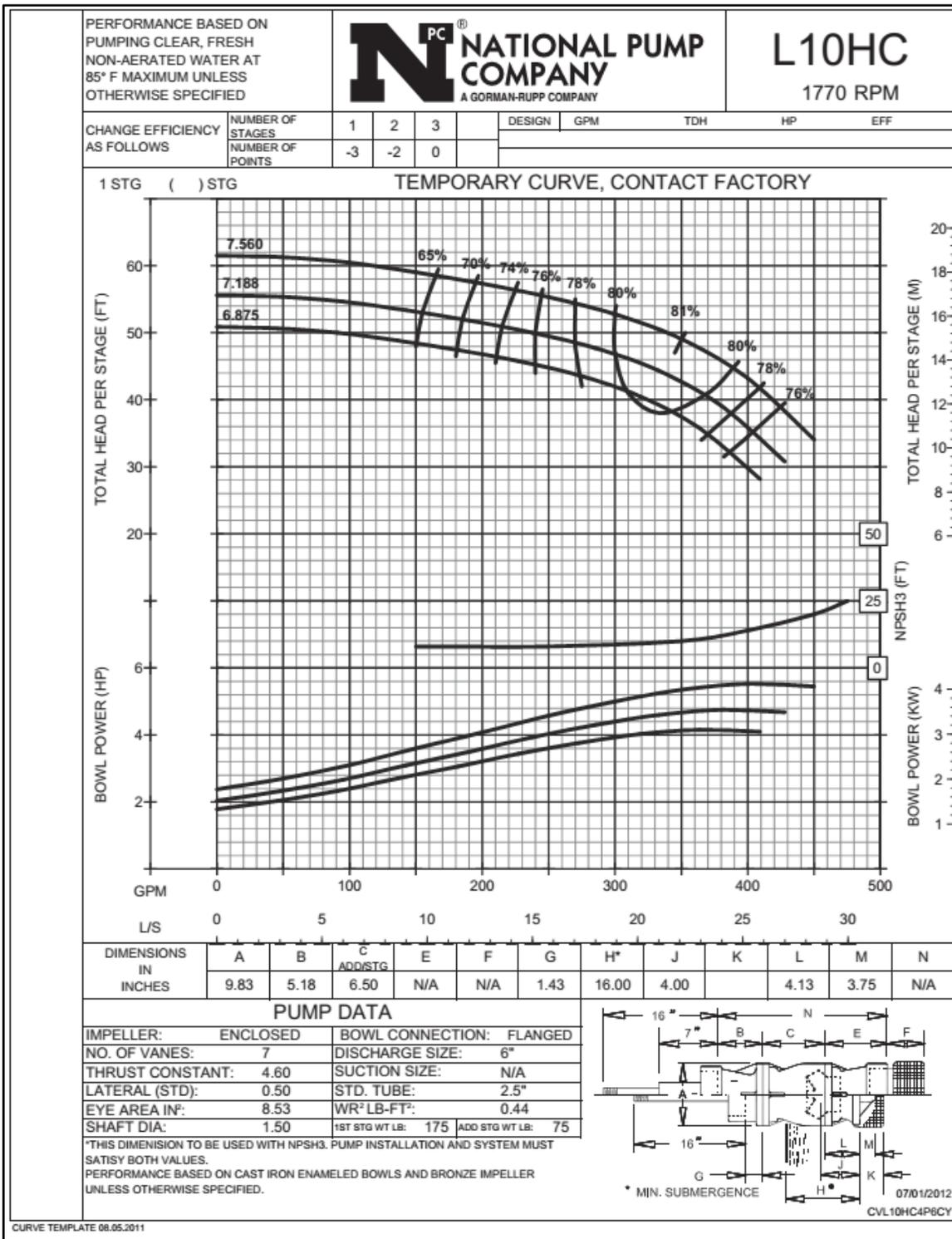


Figura 58 Hoja de datos de la nueva propuesta de bomba en plantel LA SULTANA.