



ERNESTO CHE GUEVARA

República de Cuba

Ministerio de Educación Superior

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad Metalurgia – Electromecánica

Mejoramiento del esquema del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Eléctrico

Recnier Sánchez Téllez.

Tutores: Dr. C. Michel Roberto García Avilés.
M. Sc. Iván Pérez Carrión.
Ing. Geolvis Galano Urtate.

Moa, Holguín

Julio del 2010

“Año 52 de la Revolución”

Declaración de autoridad

Yo, Requier Sánchez Téllez, autor de este trabajo de diploma titulado: "Mejoramiento del esquema del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotro Alba.", certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Dr. C. Michel Roberto García Avilés.

Tutor.

M.Sc. Iván Pérez Carrión.

Tutor.

Ing. Geolvis Galano Urtate.

Tutor.

Requier Sánchez Téllez

Diplomante.

Agradecimientos

La realización de este Trabajo de Diploma y mi éxito profesional no hubiera sido posible sin la contribución de algunas personas a quienes quisiera agradecer.

De manera especial a mis padres que han sido la guía en mi desarrollo educacional y a mi hermano aunque no está presente, por ser el ejemplo a seguir y el motivo de inspiración para la selección de mi profesión.

A mis tutores Dr. C. Michel Roberto García Avilés, M. Sc. Iván Pérez Carrión y Ing. Geolvis Galano Urtate, por sus consejos y orientación durante la realización de este trabajo.

A todos los profesores de la carrera de ingeniería eléctrica y en especial al Dr. C. Luis Delfín Rojas Purón y el Ing. Karel Bisset Hechavarria, los compañeros de mi trabajo de la Empresa Pedro Sotto Alba (Talleres Mina y Eléctrico en especial al Departamento del Laboratorio Eléctrico).

Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma a mis padres René y Caridad, a mi hermano que no se encuentra físicamente con nosotros Ing. Norge Sánchez Téllez, a mi familia y a todas aquellas personas que de alguna forma nos ayudaron en la realización de esta tesis.

Pensamientos

“...la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba es mi empresa más querida”

Ché.

“...para ser exitoso no tienes que hacer cosas extraordinarias; haz cosas ordinarias
extraordinariamente bien.”

Ché.

“...y siempre mediremos, por encima de todo un técnico y un científico no por sus
conocimientos, sino por el grado de humildad y modestia con que sea capaz de aportar sus
conocimientos”.

Fidel Castro.

ÍNDICE	pág.
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
CAPÍTULO I: Fundamentos teóricos para la proposición de mejoras en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor 194-PU-2 de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.....	5
1.1 Principio general de los variadores de velocidad.....	5
1.2 Los armónicos producidos por los variadores de velocidad.....	6
1.3 Medidas para reducir los armónicos.....	8
1.4 Protección de motores mediante el Multilin SR-469.....	12
CAPÍTULO II: Caracterización y análisis del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.....	18
2.1 Descripción del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.....	18
2.2 Análisis de los trabajos precedentes relacionados con el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.....	37
2.3 Investigación de las causas que originan los cortocircuitos monofásicos en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.....	41
CAPÍTULO III: Propuesta de mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), de la Planta de Sulfuros, en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba y valoración técnico- económica.....	52
3.1 Propuesta general del esquema mejorado.....	52
3.2 Análisis de las mejoras propuestas al accionamiento eléctrico.....	53
3.3 Valoración Económica del conjunto de mejoras propuestas al accionamiento de la bomba de licor.....	61
CONCLUSIONES GENERALES	69
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	

Resumen

En esta tesis se proponen un conjunto de mejoras al accionamiento eléctrico actual de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, para superar las causas que originan los cortocircuitos monofásicos en el conductor de media tensión (5kV). Entre las mejoras propuestas se encuentran las siguientes: 1)-prescindir del interruptor Siemens de 2000 A al vacío, 2)-reajustar el variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa a su tensión de salida de 370V a 480V, 3)-utilizar la tarjeta de comunicación del variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa, 4)-cambiar del transformador del accionamiento por un transformador especial diseñado específicamente para trabajos con variadores de velocidad (VFD) con filtros de armónicos incluidos, 5)-reubicar el Multilin SR-469, y 6)-cambiar el interruptor de alimentación del cubículo del VFD. Con la incorporación de las mejoras propuestas al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), se puede evitar un gran número de averías y ampliar su vida útil; logrando un favorable efecto económico anual, por concepto de mineral dejado de procesar al estar fuera de servicio este sistema y la compra del conductor averiado.

SUMMARY

This thesis proposes a series of improvements to the current power-operated liquor pump (194-PU-2) of Sulfides Plant, Commander Pedro Sotro Alba Company, to overcome the causes of single-phase short circuit in the (5kV) medium voltage conductor. Among the main proposals are included the following: 1)-to dispense Siemens 2000 switch A vacuum, 2) to reset the drive (VFD) Yaskawa F7 its output voltage 370V to 480V, 3)-to use communication card speed drive (VFD) Yaskawa F7, 4)-to change drive transformer by a special processor designed specifically to work with variable speed drives (VFD) including harmonic filters, 5), relocate the Multilin SR-469, and 6)-change the power switch on the VFD cubicle. With the addition of the proposed improvements to the electric drive pump liquor (194-PU-2), we can avoid a large number of breakdowns and extend their useful life, achieving a favorable economic impact annually for a longer term mineral process to be out of service this system and the purchase of faulty driver.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La Planta de Sulfuros de la compañía Moa Nickel S.A. "Pedro Sotro Alba", es la encargada de la obtención de los sulfuros de níquel y cobalto. Su principal operación tecnológica consiste en la precipitación de los metales en forma de sulfuros a partir de los sulfatos de níquel y cobalto contenidos en el licor producto, proveniente de la planta de neutralización; con el objetivo de extraer selectivamente el níquel y el cobalto de la solución y separarlos de las impurezas.

El accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros, está conformado en su parte de fuerza por un interruptor Siemens de alimentación (52), que alimenta al cubículo del variador de velocidad, modelo F7 Yaskawa de 500 HP, equivalente a 373 kW, con un tensión de 480 V. Este a su vez suministra energía a un transformador elevador de 400 kVA, de 480V a 4160V con cinco derivaciones por el lado secundario, el cual es el encargado de alimentar al motor de 200 kW (268 HP), y a su vez mueve una bomba centrífuga acoplada en su eje, encargada de bombear el flujo de licor desde el tanque de precalentamiento hacia la autoclave #.2, asociado a esto se encuentran otros elementos tales como: Multilin SR-469 destinado a las protecciones eléctricas, transformadores de potencial y de corrientes destinados para señales de medición, interruptores de control y elementos asociados al variador; los cuales operan en el funcionamiento del sistema.

En los últimos tiempos se vienen produciendo cortocircuitos en el circuito del accionamiento de la bomba de licor (194-PU-2), muy perjudiciales para la continuidad de la producción de esta industria minera. En el año 2009 se produce una falla de cortocircuito monofásico en el conductor de media tensión (4.16kV) que conlleva el cambio del mismo y una afectación a la producción en el autoclave # 2 de la Planta de Sulfuros por seis horas que representa una pérdida de seis toneladas de sulfuro de Ni+ Co. Las pérdidas totales estuvieron alrededor de los 90 566.64 CUC.

En la remodelación del sistema eléctrico de la bomba de licor de la planta de Precipitación de Sulfuros a partir del año 2002, vienen sucediendo una serie de cortocircuito monofásicos en el conductor de media tensión (4.16kV) de alimentación al motor (alrededor de seis o más fallas). Estas han proporcionado un incremento del gasto económico por concepto de la compra del mismo, alrededor de 80 m, lo que significa 3 788.8 CUC, más los gastos por producción, mano de obra, entre otras, lo que calculando se obtiene 26521,60 CUC, solo por

concepto de cables. Como dato a resaltar en el año 2009 ocurrieron dos fallas más de los accionamientos eléctricos del mismo tipo (194-PU-2 y una 194-PU-1), lo que quiere decir que en total fueron tres fallas de cortocircuito monofásico en la misma Planta de Sulfuros.

El ejemplo anterior demuestra la necesidad de disminuir al máximo la ocurrencia de los cortocircuitos perjudiciales en el mencionado accionamiento, dado que la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba posee un importante peso económico para Cuba.

Problema:

Necesidad de superar las causas que originan los cortocircuitos en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

Objetivo de la investigación:

Proponer un conjunto de mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, para superar las causas que originan los cortocircuitos.

Objeto de la investigación:

El accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

Tareas investigativas:

1. Descripción del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
2. Análisis los trabajos precedentes para mejorar el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
3. Instalación de un sistema de monitoreo que obtenga una base de datos de variables eléctricas del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de

Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, para identificar las causas que originan los cortocircuitos.

4. Análisis de la base de datos obtenida para identificar las causas que originan los cortocircuitos monofásicos en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
5. Proposición de mejoras del esquema del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de Planta de Sulfuros de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba para eliminar las causas que originan los cortocircuitos monofásicos.
6. Realización de un análisis económico del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba a partir de la introducción de las mejoras propuestas.

Hipótesis:

Si se instala un sistema de monitoreo que permita crear un base de datos de variables eléctricas del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, se podrán identificar las causas que originan los cortocircuitos y proponer mejoras al accionamiento para superarlas.

Resultados esperados:

- Obtención de base de datos de las variables eléctricas, para el análisis y recomendaciones de mejoras del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.
- Mejoramiento del esquema del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

- Hacer más confiable las protecciones eléctricas destinadas a proteger al motor en cuanto a selectividad y sensibilidad del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

Capítulo I: Fundamentos teóricos para la proposición de mejoras en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor 194-PU-2 de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

En el presente capítulo se tratarán los fundamentos teóricos para la proposición de mejoras en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor 194-PU-2 de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Se aborda el tema del principio general de los variadores de velocidad, los armónicos que éstos producen, las medidas para superarlos y las protecciones de los motores de los accionamientos mediante los Multilin.

1.1 Principio general de los variadores de velocidad.

Los variadores de velocidad, también llamados convertidores de frecuencia, son dispositivos utilizados para regular los procesos industriales. Se trata de equipos utilizados hoy en día en múltiples aplicaciones, existiendo un buen número de fabricantes y suministradores.

Un variador de frecuencia, VFD por sus siglas en inglés (Variable Frequency Drive) o bien AFD (Adjustable Frequency Drive), es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Otra forma de cambiar la velocidad del motor sería cambiando el número de polos del motor, aunque esta técnica resulta ineficiente ya que habría que cambiar las características físicas del motor.

El principio de funcionamiento del variador de velocidad consiste en convertir el voltaje de CA a un voltaje de CD por medio de un puente rectificador trifásico compuesto por seis diodos para posteriormente convertir ese mismo voltaje de CD a un voltaje de CA por medio de un puente inversor trifásico compuesto por seis transistores de potencia IGBT, los cuales controlan el voltaje de CA variando su frecuencia.

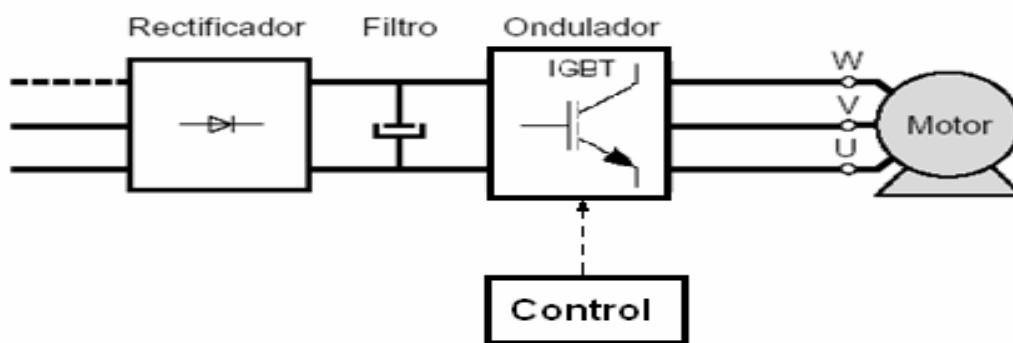


Figura 1.1a Esquema simplificado de un VFD.

1.2 Los armónicos producidos por los variadores de velocidad.

Origen de los armónicos.

Los equipos generadores de armónicos están presentes en todas las instalaciones industriales, comerciales y residenciales. Los armónicos están provocados por las cargas no lineales.

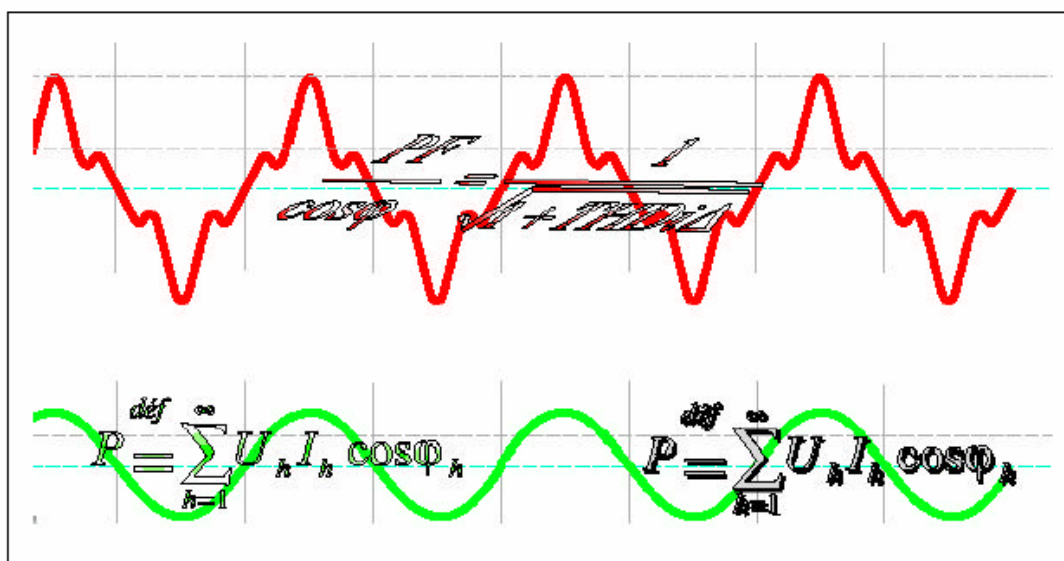


Figura 1.2a Distorsión de la onda sinusoidal por los armónicos

Una carga es considerada no lineal cuando la intensidad que circula por ella no tiene la misma forma sinusoidal que la tensión que la alimenta.

Los equipos que contienen circuitos con electrónica de potencia son cargas no lineales típicas. Este tipo de cargas son cada vez más frecuentes y su porcentaje en el consumo total de la instalación aumenta constantemente. Entre ellos se encuentran:

1. Los equipos industriales (máquinas de soldar, hornos por arco, hornos de inducción y rectificadores).
2. Aplicaciones domésticas (equipos de televisión, hornos microondas, iluminación, fluorescente, etc.).
3. La saturación de los equipos (básicamente de los transformadores) también puede provocar intensidades no lineales.
4. Variadores de velocidad para motores.

El flujo de armónicos en una instalación reduce la calidad de la energía y origina numerosos problemas:

1. Sobrecarga de la red por el incremento de la intensidad eficaz.
2. Sobrecarga de los conductores del neutro debido a la suma de los armónicos de rango tres, generados por las cargas monofásicas.
3. Sobrecarga, vibraciones y envejecimiento prematuro de los alternadores, transformadores y motores; zumbido de los transformadores.
4. Sobrecarga y envejecimiento prematuro de los condensadores de compensación de energía reactiva.
5. Deformación de la tensión de alimentación pudiendo perturbar a los receptores sensibles.
6. Perturbación de las redes de comunicación o de las líneas telefónicas.

Los armónicos tienen un impacto económico importante. En efecto:

1. El envejecimiento prematuro de los equipos supone que deben reemplazarse con anterioridad, a menos que se hayan sobredimensionado inicialmente.
2. Las sobrecargas de la instalación obligan a aumentar la potencia contratada, e implican, si no existe un sobredimensionamiento de la instalación, pérdidas suplementarias.
3. Las perturbaciones en intensidad producen disparos intempestivos y el paro de los equipos de producción.

Estos costos de material, pérdidas energéticas y de productividad contribuyen a la pérdida e competitividad de las Empresas.

Los armónicos son, en muchas ocasiones, difíciles de reducir, pues son originados por equipos vitales para la actividad de una empresa. En general la presencia de los armónicos de orden superior causa problemas en la calidad y eficiencia de la energía suministrada por los inversores sinusoidales de voltajes a los accionamientos con motores asincrónicos, los cuales son muy utilizados en las industrias. Disminuyendo la eficiencia de los sistemas de accionamientos eléctricos de acuerdo al índice de modulación de la onda sinusoidal de voltaje de entrega al motor, tomando como ejemplo inversores modulados con dispositivos semiconductores.

Los armónicos de corriente y tensión pueden comprometer fuertemente los transformadores, hasta destruirlos.

1.3 Medidas para reducir los armónicos

Frente al fenómeno de los armónicos existen principalmente dos tipos de soluciones, a veces complementarias, propuestas por Schneider Electric:

- El sobredimensionamiento del transformador desde su concepción.
- La colocación de sistemas de filtros para proteger la instalación.

Sobredimensionamiento del transformador

Desde un punto de vista térmico, los transformadores deben ser sobredimensionados para tener en cuenta corrientes armónicas que generan pérdidas especiales suplementarias. En el caso de una red contaminada por armónicos de corriente, los documentos de armonización HD 428 y HD538 definen respectivamente para los transformadores en aceite y secos de distribución ya instalados coeficientes de reducción de potencia determinados a partir de la tasa y rango de los armónicos de corriente.

La presencia de armónicos de tensión, debido a los huecos de tensión, comprometen fuertemente a los aislantes del transformador. Estos huecos de conmutación repetitivos (con frecuencia de oscilación de 10 kHz) pueden conducir a un envejecimiento prematuro del transformador o a una resonancia interna con sus arrollamientos cuando las frecuencias coinciden con la de las oscilaciones de los huecos de conmutación.

La curva de la figura 1.3a, extraída del proyecto de la Guía de aplicación IEEE 519 de 1996, da la desclasificación típica a aplicar a un transformador alimentando cargas electrónicas.

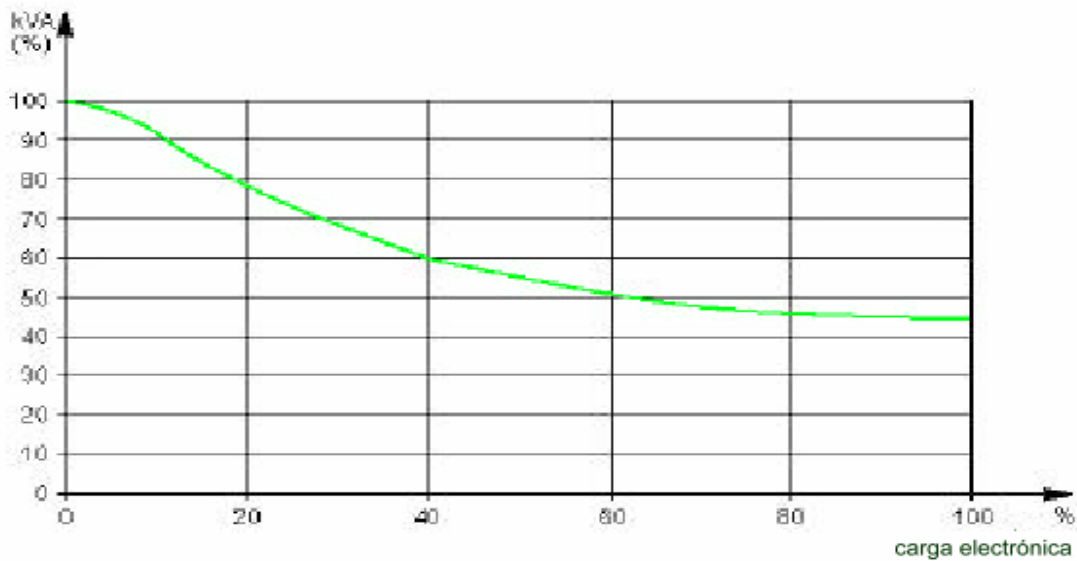


Figura 1.3a Tasa de desclasificación a aplicar a un transformador que alimenta cargas electrónicas.

La norma UTE C15-112 suministra un factor de desclasificación de transformadores en función de las corrientes armónicas:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \left(\sum_{h=2}^{40} h^{1,6} \cdot T_h^2 \right)}}$$

$$T_h = \frac{I_h}{I_1}$$

Valores típicos:

- Corrientes “de forma rectangular” (espectro en $1/h^*$): $k = 0,86$
- Corriente tipo convertidor de frecuencia (THD @ 50%): $k = 0,80$

(*) En realidad, la forma de la señal de corriente se aproxima a una forma rectangular; este es el caso de todos los rectificadores de corriente (rectificadores trifásicos, hornos de inducción,...).

□ La norma ANSI C57.110 define un coeficiente de desclasificación llamado « factor K » por la fórmula siguiente:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot h^2}{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_{\text{eff}}} \right)^2 \cdot h^2$$

Este coeficiente de desclasificación factor K, más restrictivo, es muy utilizado en América del Norte.

Esta solución de sobredimensionamiento solo puede ser contemplada cuando es conocida la polución armónica y transmitida al fabricante antes del estudio del transformador.

Otra solución preventiva que puede aplicarse a transformadores consiste en utilizar **transformadores con acoplamientos especiales**, ya que algunos grupos de conexión tienen la propiedad de suprimir ciertos rangos de armónicos.

De forma que:

- un grupo de conexión " **Dyd** " frena los armónicos de rango 5 y 7.
- un grupo de conexión " **Dy** " frena los armónicos de rango 3 (los armónicos circulan por cada fase y se cierran por el neutro del transformador).
- un grupo de conexión " **DZ5** " frena los armónicos de rango 5 (que se cierran por el circuito magnético).

Filtrado de armónicos

Tres tipos de filtros suelen utilizarse en función de la aplicación de la fuente de armónicos:

- El filtro pasivo
- El filtro activo
- El filtro híbrido

El filtro pasivo:

Consiste en un circuito LC sintonizado para cada frecuencia armónica a filtrar, en paralelo con el generador de armónicos. Este circuito en derivación absorbe los armónicos y evita que circulen hacia la alimentación.

En general, el filtro pasivo esta sintonizado sobre un rango de armónicos próximo al armónico a eliminar. Varias ramas del filtro en paralelo pueden ser utilizadas cuando se necesita una fuerte reducción de la tasa de distorsión en varios rangos.

Aplicaciones típicas:

- ✓ Instalaciones industriales con un conjunto de generadores de armónicos de potencia total superior a 200 kVA aproximadamente (variadores de velocidad, SAIS, rectificadores),
- ✓ Instalaciones con compensación de energía reactiva
- ✓ Necesidad de reducción de la tasa de distorsión en tensión para evitar perturbaciones en receptores sensibles,
- ✓ Necesidad de reducción de la tasa de distorsión de corriente para evitar sobrecargas.

El filtro activo:

Se exponen seguidamente los sistemas electrónicos de potencia instalados en serie o paralelo con las cargas no lineales al objeto de compensar las tensiones o las corrientes armónicas que generan. El filtro activo reinyecta en oposición de fase los armónicos presentes en la alimentación de la carga, de tal forma que la corriente de línea sea senoidal.

Aplicaciones típicas:

- ✓ Instalaciones terciarias con generadores de armónicos de potencia total inferior a 200 kVA (variadores de velocidad, SAIS, ofimática,...),
- ✓ Necesidad de reducción de la tasa de distorsión en corriente para evitar sobrecargas.

El filtro híbrido:

Los dos tipos de dispositivos precedentes pueden ser asociados en un mismo equipo y constituir un filtro híbrido. Esta nueva solución de filtrado permite acumular las ventajas de las soluciones existentes y cubrir un amplio margen de potencias y posibilidades.

Aplicaciones típicas:

- ✓ Instalaciones industriales con conjuntos de generadores de armónicos de potencia total superior a 200 kVA aproximadamente (variadores de velocidad, SAIS, rectificadores,...),
- ✓ Instalaciones con compensación de energía reactiva.
- ✓ Necesidad de reducción de tasas de distorsión de tensión para evitar perturbaciones en receptores sensibles,
- ✓ Necesidad de reducir las tasas de distorsión de corriente para evitar sobrecargas,
- ✓ Aplicaciones para satisfacer los límites normalizados de emisión armónica.

Criterios y guía de elección del filtro:

Estos criterios permiten promulgar una guía de elección del filtro (tabla 1.3a), en función de la aplicación requerida.

Tabla 1.3a Criterios para la selección de los filtros

Tipo de aplicación	Filtro pasivo	Filtro activo	Filtro híbrido
Edificio terciario (Informática, climatización, alumbrado, ascensores)	■	■ ■ ■	■ ■
Industria papel, cartón, plástico (transporte, enrollado, desenrollado)	■ ■ ■	■	■ ■
Industria tratamiento de agua (bombeo, soldadura)	■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
Manutención (elevación de grúas)	■ ■	■	■ ■ ■

Leyenda:

- ■ ■ ■: Totalmente adaptado.
- ■ ■: Totalmente adaptado técnicamente, pero económicamente no optimizado.
- ■: Solución satisfactoria.

Otras soluciones preventivas básicas para atenuar los efectos de los armónicos consisten en:

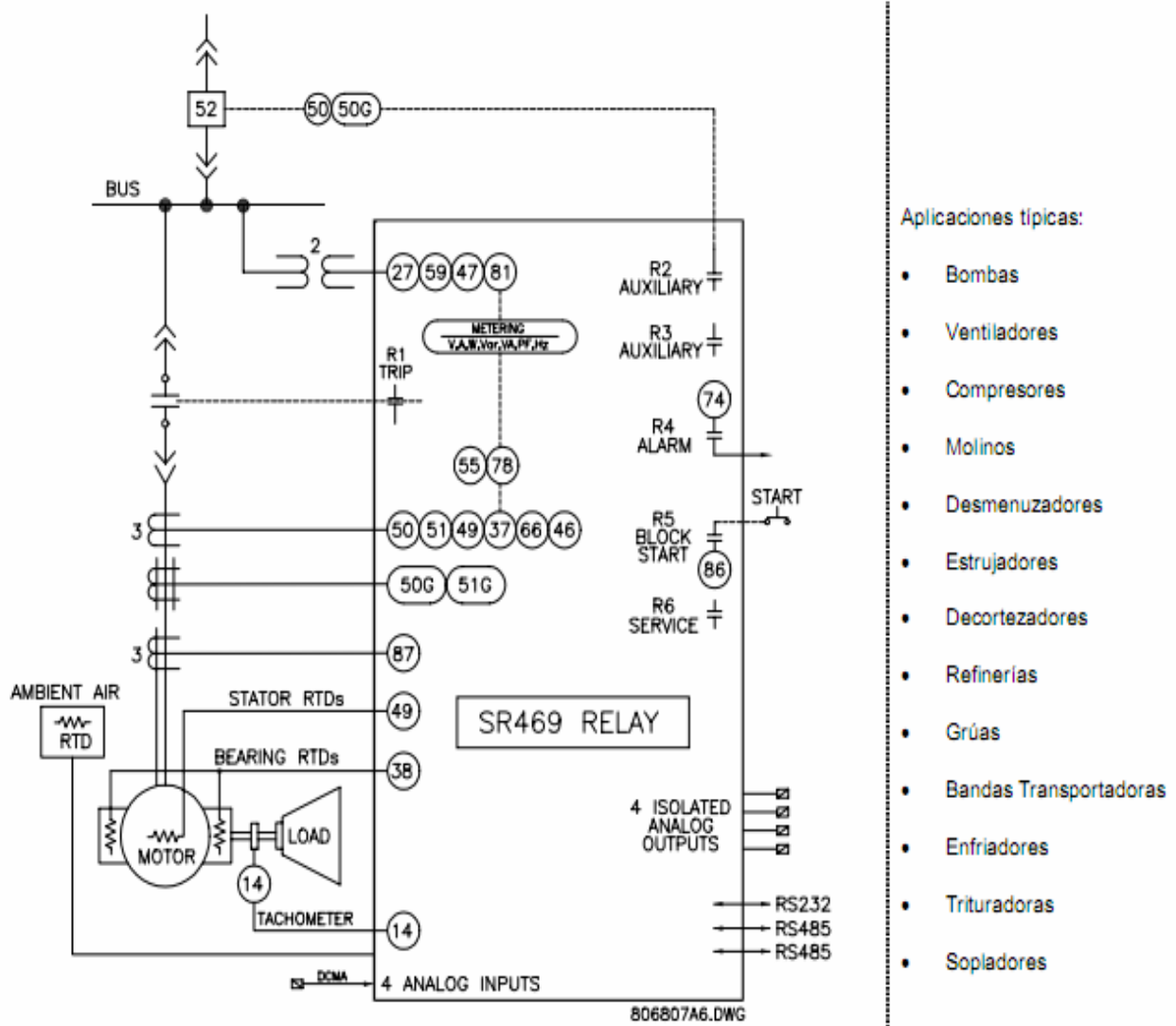
- Posicionar las cargas polucionantes al principio de la red,
- Reagrupar las cargas polucionantes,
- Separar las fuentes de alimentación,
- Utilizar transformadores con grupos de conexión especiales,
- Disponer inductancias en la instalación,
- Elegir un esquema de conexión a tierra adaptado.

1.4 Protección de motores mediante el Multilin SR-469.

El Multilin SR-469

El Multilin SR-469 para manejo de motores, está basado en un microprocesador, y ha sido diseñado para la protección de motores y equipos impulsados de mediana y alta capacidad.

Está equipado con seis relés de salida para disparos, alarmas y bloques de arranque. La protección de motores, el diagnóstico de fallas, la medición de potencia y las funciones RTU están integradas en un paquete económico removible. El diagrama unifilar de la Figura 1.4a ilustra la funcionalidad del SR-469 utilizando los números de dispositivo de acuerdo a las normas ANSI (Instituto Nacional Americano de Normas).



Aplicaciones típicas:

- Bombas
- Ventiladores
- Compresores
- Molinos
- Desmenzadores
- Estrujadores
- Decortezadores
- Refinerías
- Grúas
- Bandas Transportadoras
- Enfriadores
- Trituradoras
- Sopladores

Figura 1.4a Diagrama unifilar del SR-469

El Multilin SR-469 brinda un sin número de posibilidades, algunas de las cuales son descriptas a continuación:

- Las cuatro entradas digitales asignables, pueden ser configuradas para diferentes funciones incluyendo tacómetro o disparo genérico y alarma con nombre programable.

- El modelo térmico incorpora polarización desbalanceada, realimentación por RTD y enfriamiento exponencial.
- Además de las quince curvas normales de sobrecarga, el SR-469 dispone de una curva – usuario - definida y una curva diseñada específicamente para el arranque con cargas de alta inercia, cuando el tiempo de aceleración excede el tiempo de obstrucción permitido.
- Una segunda curva de sobrecarga es proporcionada para motores de dos velocidades.
- Las fallas a tierra o fugas a tierra de hasta 0.25A pueden ser detectadas utilizando el TC para tierra Multilin 50:0.025.
- También proporciona entradas de TC para protección diferencial de fase.
- Las doce entradas para RTD que se proporcionan pueden ser individualmente programadas en el campo para diferentes tipos de RTD.
- Las entradas de transformador de voltaje permiten numerosas características de protección basadas en las cantidades de voltaje y potencia.
- Las cuatro entradas analógicas de 4-20mA pueden ser utilizadas para disparo y alarma, relacionadas a cualquier entrada de transductor tales como vibración, presión, flujo, etc.

Descripción de las protecciones a utilizar para el accionamiento, a través de Multilin SR-469.

Las protecciones a utilizar para el accionamiento, a través de Multilin SR-469, se muestran en la figura 1.4b.

ANSI		Trip	Alarm	Block Start	Control
51	Overload	●	●	●	●
86	Overload Lockout			●	
66	Starts/Hour & Time Between Starts			●	
	Restart Block (Anti-Backspin Timer)			●	
50	Short Circuit & Short Circuit Backup	●		●	
	Mechanical Jam	●		●	●
37	Undercurrent/Underpower	●	●	●	
46	Current Unbalance	●	●	●	
50G/51G	Ground Fault & Ground Fault Backup	●	●	●	
87	Differential	●		●	
	Acceleration	●		●	
49	Stator RTD	●	●	●	
38	Bearing RTD	●	●	●	
	Other RTD & Ambient RTD	●	●	●	
	Open RTD Alarm		●		
	Short/Low RTD		●		
27/59	Undervoltage/Overvoltage	●	●	●	
47	Phase Reversal	●		●	
81	Frequency	●	●	●	
	Reactive Power	●	●	●	●
55/78	Power Factor	●	●	●	●
	Analog Input	●	●	●	
	Demand Alarm: A kW kvar kVA		●		●
	SR469 Self-Test, Service		●		
	Trip Coil Supervision		●		
	Welded Contactor		●		
	Breaker Failure		●		
	Remote Switch	●	●	●	
14	Speed Switch & Tachometer Trip	●	●	●	
	Load Shed Switch	●		●	
	Pressure Switch	●	●	●	
	Vibration Switch	●	●	●	
19	Reduced Voltage Start				●
48	Incomplete Sequence	●		●	●
	Remote Start/Stop				●

Figura 1.4b Protecciones a utilizar del Multilin SR-469 para un accionamiento.

Los diagnósticos de fallas son proporcionados a través de la recolección de datos de pre-disparo, del registrador de eventos, de la memoria de rastreo y de estadísticas.

Antes de la emisión del disparo, el SR-469 tomará una instantánea de los parámetros medidos, los que serán almacenados con la causa del disparo. Estos datos previos al disparo pueden ser accedidos utilizando la tecla [NEXT] antes de la reposición, o revisando los datos del último disparo en los Valores Actuales.

El sistema de registro del SR-469 puede almacenar hasta cuarenta eventos con hora y fecha, incluyendo datos previos al disparo. Cada vez que un disparo ocurre, el SR-469 almacenará en memoria ocho ciclos antes y ocho ciclos después del disparo, para todas las cantidades de AC tomadas. Los contadores de disparos registran el número de ocurrencias de cada tipo de disparo. Valores mínimos, máximos de RTD y entradas analógicas, también son registrados. Estas características permitirán que el operador determine con certeza y rapidez, la naturaleza del problema.

Los relevadores Multilin de estos tiempos utilizan el protocolo de comunicación IEC 61850, este protocolo es un estándar internacional para la comunicación en subestaciones y es hoy en día el medio de integración más importante de todos los equipos de protección, control, SCADA. La adopción de este nuevo estándar esta abierta a todos los fabricantes y Empresas de energía, promoviendo su crecimiento como una solución común a nivel mundial, sin ningún favoritismo o prejuicios históricos.

Beneficios de IEC 61850:

- Solución rentable debido a la reducción de cableado interno.
- Programación flexible que permite agregar relevadores y nuevas funciones de protección sin afectar el cableado físico.
- Compatibilidad mejorada permitiendo la comunicación entre relevadores de cualquier fabricante.

Los PLC que utilizamos en Moa Níckel también pueden ser comprados con este protocolo de comunicación.

Conclusiones del Capítulo 1:

- El variador de velocidad es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor, y tienen una amplia aplicación en accionamientos de importancia dentro de la industria. Tienen como deficiencia que generan armónicos perjudiciales para los demás elementos de la red eléctrica.
- Frente al fenómeno de los armónicos existen principalmente dos tipos de soluciones, a veces complementarias: el sobredimensionamiento del transformador y la colocación de sistemas de filtros para proteger la instalación.
- El Multilin SR-469 para manejo de motores, está basado en un microprocesador, y ha sido diseñado para la protección de motores y equipos impulsados de mediana y alta capacidad.

CAPÍTULO II Caracterización y análisis del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.

En este capítulo se hace referencia a la caracterización y análisis del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba. Donde se tratará la descripción y análisis de los trabajos precedentes relacionados con el accionamiento eléctrico. La investigación de las causas que originan los cortocircuitos monofásicos en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.

2.1 Descripción del accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.

Descripción del proceso productivo de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba

La Planta de Sulfuros es la encargada de la obtención de los sulfuros de níquel y cobalto, producto final de la compañía Moa Nickel S.A. "Pedro Sotto Alba". Su principal operación tecnológica consiste en la precipitación de los metales en forma de sulfuros a partir de los sulfatos de níquel y cobalto contenidos en el licor producto, proveniente de la planta de neutralización; con el objetivo de extraer selectivamente el níquel y el cobalto de la solución y separarlos de las impurezas.

La planta está diseñada para procesar el licor, producto de la lixiviación del mineral después de ser decantados los sólidos en la planta de lavaderos y ser acondicionado este licor de sulfatos de metales ricos en níquel y cobalto, en la planta de neutralización, mediante la reducción del hierro, cromo, la precipitación del cobre con la inyección de H₂S gaseoso a bajas presiones y la neutralización del ácido libre (figura 2.1a).

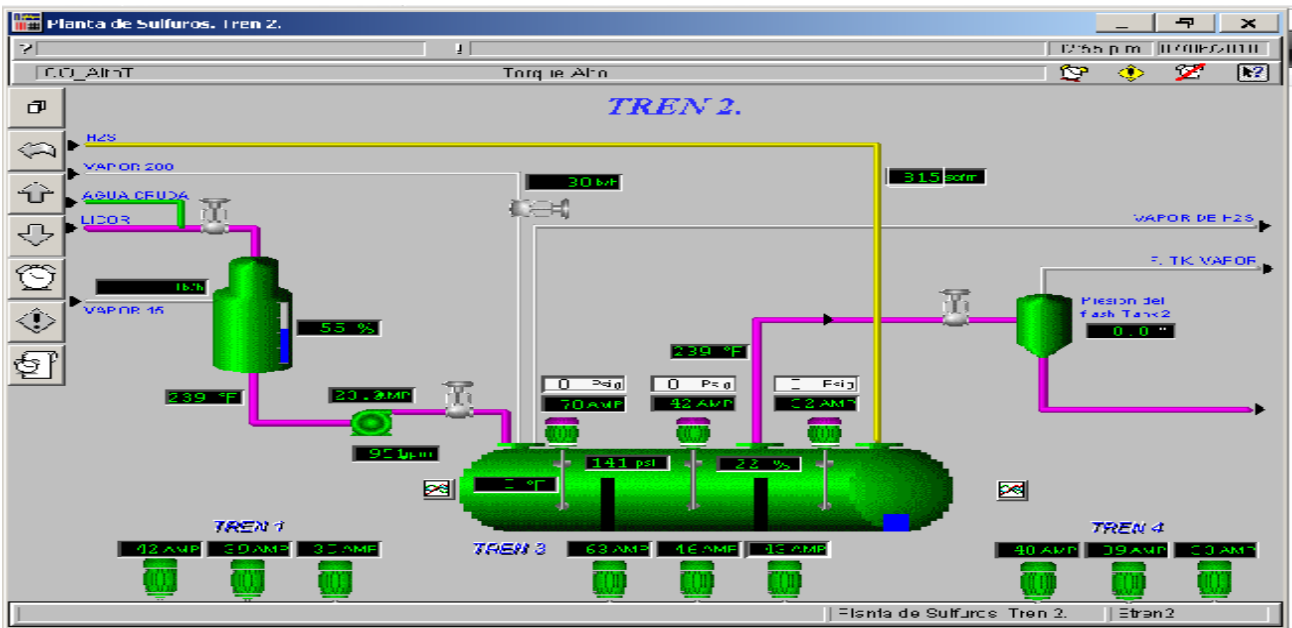


Figura 2.1a Tren 2 de la Planta de Sulfuros representado en el sistema SCADA (Citect).

Función de la bomba de licor (194-PU-2).

Succionar el licor proveniente del calentador y suministrarlo a través de una válvula de control automático al autoclave # 2.

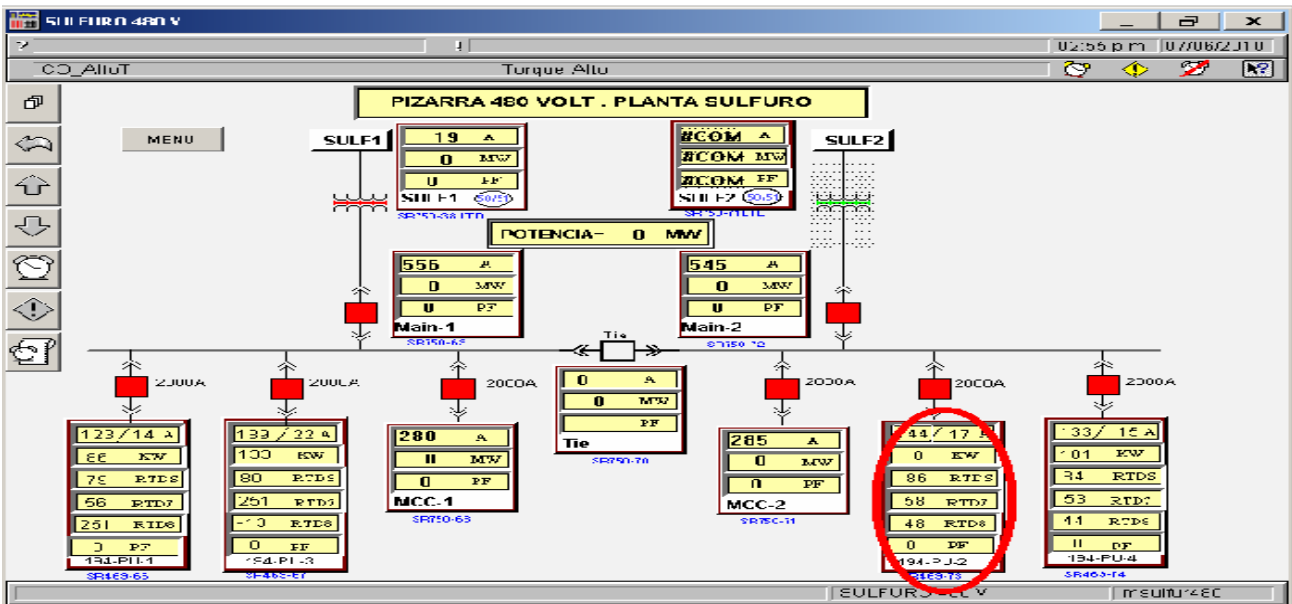


Figura 2.1b Esquema monolineal de la Planta de Sulfuros

Breve descripción del accionamiento eléctrico.

En la figura 2.1b se representa el esquema monolineal de la Planta de Sulfuros. El lugar donde se encuentra el óvalo rojo corresponde al accionamiento eléctrico objeto de estudio de esta tesis.

El accionamiento eléctrico está conformado en su parte de fuerza por un interruptor Siemens de alimentación (52), que alimenta al cubículo del variador de velocidad, modelo F7 Yaskawa de 500 HP, equivalente a 373 kW, con un tensión de 480 V. Este a su vez suministra energía a un transformador elevador de 400 kVA, de 480V a 4160V con cinco derivaciones por el lado secundario, el cual es el encargado de alimentar al motor de 200 kW (268 HP), y a su vez mueve una bomba centrífuga acoplada en su eje, encargada de bombear el flujo de licor desde el tanque de precalentamiento hacia la autoclave #.2, asociado a esto se encuentran otros elementos tales como: Multilin SR-469 destinado a las protecciones eléctricas, transformadores de potencial y de corrientes destinados para señales de medición, interruptores de control y elementos asociados al variador; los cuales operan en el funcionamiento del sistema.

Componentes del accionamiento eléctrico.

En la actualidad, en la Empresa "Pedro Sotto Alba", se han implementado varios tipos de accionamientos eléctricos, los cuales han trabajado de forma beneficiosa tanto para el sistema productivo, como para la realización de estudios que han aportado soluciones y mejoras de otros sistemas.

El tema en cuestión está basado en la implementación de tecnología de punta a nivel mundial, demostrando eficiencia en el control y protección de los accionamientos, donde se emplean motores asíncronos como elemento de carga acoplados a bombas centrífugas (par cuadrático). Estos en su funcionamiento emplean sensores de control, protección y medición, que hacen que el sistema opere de una forma más eficiente, logrando al final un control regulable en el proceso productivo de la Empresa.

El sistema consta de varios componentes tanto como en la parte de fuerza, así como en la parte de control, que operan directa o indirectamente sobre la regulación de la velocidad del motor, logrando variar el flujo del bombeo de licor en la Planta de Sulfuros.

El sistema de bombeo de licor de la Planta de Sulfuros de la autoclave # 2 se realiza a través de una bomba centrífuga de par cuadrático, movida a través de todo un sistema de accionamiento eléctrico representado en la figura 2.1c.

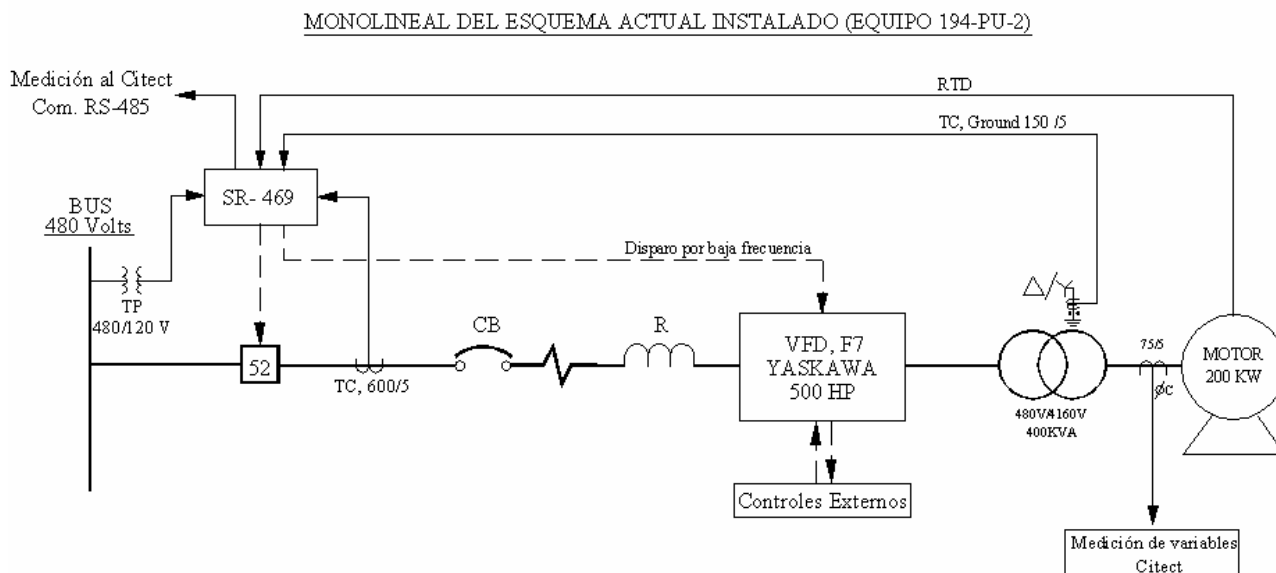


Figura 2.1c Esquema monolineal actual instalado del accionamiento eléctrico.

Descripción de las diferentes partes del sistema eléctrico.

Como se hizo referencia anteriormente, el accionamiento está compuesto por varios elementos eléctricos, los cuales tienen su función específica en el esquema, ya sea como: elementos de alimentación, protección, de control, entre otros.

ELEMENTOS QUE COMPONEN EL ACCIONAMIENTO ELÉCTRICO

Esquema de fuerza:

1. **Interruptor general (52).** Este es un interruptor del modelo Siemens de 2000 A al vacío, 50/60 Hz, Modelo 3WS1570-OWA66-1JA6-Z, hecho en Alemania, con una tensión de operación permisible hasta 690 V.



Figura 2.1d Interruptor Siemens de 2000 A

- Interruptor de alimentación en cubículo del VFD.** Modelo NZM 12-800-NA Kloner Moeller de 800 A, a una tensión permisible de 600 V, con protección térmica.
- Reactor de entrada al variador de velocidad.** Modelo MTE RL-75003, 0.048mH, 750 A, $I_n=938A$, tensión máxima 690 V, 50/60Hz, trifásico.
- Variador de velocidad.** Este es de la firma Yaskawa, modelo F7, trifásico (CIMR-F7U4300) de 500 HP (373 kW), a una tensión de 460 V y 510 kVA, con una corriente nominal de 675 A y una frecuencia de entrada a 60 Hz.
- Transformador de fuerza elevador.** STEIN INDUSTRIES INC, de tensión por el lado primario (LV) a 480V, y por el secundario (HV) a 4160V con cinco derivaciones por el lado de media tensión, que opera sin carga, como se muestra en la tabla 2.1a, con una potencia de 400 kVA, del tipo ONAN, $Z=6,3\%$ a 65 0C, con conexión delta / estrella aterrada, frecuencia de trabajo de 60 Hz, trifásico, masa = 2,4 t, con un volumen de 605,6 lts de aceite. Tiene fusible por las tres fases de 100A tipo (K).

Tabla 2.1a derivaciones secundarias del transformador de fuerza.

Derivaciones secundarias				
Enrollados	Voltajes	Posición del Tap	%	Conexión
Estrella Alto voltaje	4368	A	105.0	4 – 5
	4264	B	102.5	3 – 5
	4160	C	100.0	3 – 6
	4056	D	97.50	2 – 6
	3952	E	95.00	2 - 7
Delta Bajo voltaje	480			

El transformador de fuerza es el encargado de elevar la tensión de salida del VFD (480 V máximo), hasta el valor nominal del motor (4 160 V), sumergido en aceite, de construcción convencional, actualmente se encuentra ajustado en el Tap #. E, que corresponde a un valor de tensión de 3 952 V, para amortiguar las sobretensiones.

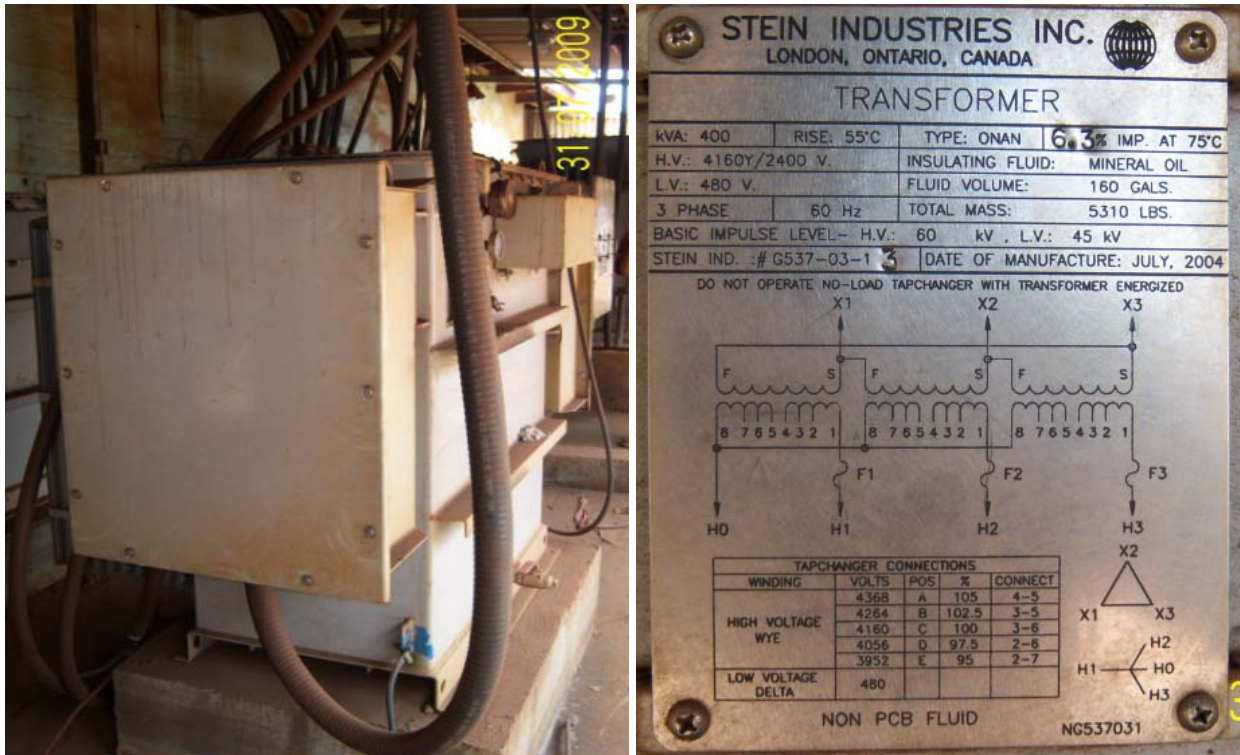


Figura 2.1e Transformador de fuerza y datos de chapa.

- 6. Motor eléctrico asincrónico.** De la firma Loher, modelo DHSW-355MB-02A, de 200 kW (equivalente a 268 HP), con una tensión de operación de 4160V en estrella, de corriente nominal 32,5 A, $\cos \Phi=0.91$, a una frecuencia de 60 Hz, FS.1.15, IP. 65, con una masa de 1,64 t y una velocidad de 3575 rpm.

El motor asincrónico, con rotor en jaula de ardilla, una tensión nominal de 4 160 V, 200 kW, 3575 rpm, 32.5A y factor de servicio (FS) de 1.15, el mismo tiene acoplado en su eje una bomba centrífuga, con cinco sensores de temperatura, tres en el enrollado y dos en los cojinetes (RTD tipo, PT-100), que brindan la temperatura real del motor al Multilin SR-469. Además tiene implícito una resistencia de calentamiento de 300 W, para mantener el motor caliente en el tiempo que se encuentre parado, para evitar alojamiento de humedad en los enrollados.

Teniendo en cuenta la altura que se debe de bombear el licor por la bomba, se habilitó un freno mecánico acoplado en el rotor del motor, para evitar que el mismo retroceda. Además presenta enfriamiento forzado a través de un ventilador que no genera chispa, el tamaño pequeño reduce el ruido y aumenta la eficiencia instalado con chaveta en el eje, de montaje horizontal, a prueba de explosiones. La condición a prueba de explosión consiste en un armazón de hierro fundido con buje de bronce con un mínimo de holgura que no permite salir ninguna chispa del estator hacia el exterior ya que en un momento determinado pueda existir una rotura en el aislamiento y puede producir una chispa, tiene además un retenedor de grasa que no permite botar grasa de los rodamiento y tiene dos polos.



Figura 2.1f Motor eléctrico de 200 kW

7. Cables de fuerza.

- De media tensión.** TECK 90, 3c # 2 AWG, 5000 V, conductores de cobre, con forro exterior de PVC (PVC Poli Vinil Cloruro), con blindaje metálico de aluminio y aislamiento del conductor XLPE (Poli Etileno reticulado).

- De bajo voltaje.** TECK 90, con recubrimiento en aluminio, 350 MCMIL, con tensión nominal de 1000 V a 40 °C, fabricado en Canadá.

Esquema de control:

- 1. Multilin SR-469.** Destinado para protecciones eléctricas de motores, de la GE Power Management, Modelo. N^o. 469-P5-HI-A20-E, hecho en Canadá (Anexo 2.1a).

El Multilin SR-469 presenta algunas características específicas de protección. Las cuatro entradas digitales asignables, pueden ser configuradas para diferentes funciones incluyendo el tacómetro o disparo genérico y la alarma con nombre programable. El modelo térmico incorpora polarización desbalanceada, realimentación por RTD y

enfriamiento exponencial. Además de las quince curvas normales de sobrecarga, el SR-469 dispone de una curva-usuario-definida y una curva diseñada específicamente para el arranque con cargas de alta inercia, cuando el tiempo de aceleración excede el tiempo de obstrucción permitido. Una segunda curva de sobrecarga es proporcionada para motores de dos velocidades. Las fallas a tierra o fugas a tierra de hasta 0.25A pueden ser detectadas utilizando el TC para tierra Multilin 50:0.025.

También proporciona entradas de TC para protección diferencial de fase. Las doce entradas para RTD que se proporcionan pueden ser individualmente programadas en el campo para diferentes tipos de RTD. Las entradas de transformador de voltaje permiten numerosas características de protección basadas en las cantidades de voltaje y potencia. Las cuatro entradas analógicas de 4-20 mA pueden ser utilizadas para disparo y alarma, relacionadas a cualquier entrada de transductor tales como vibración, presión, flujo, etc.

Los diagnósticos de fallas son proporcionados a través de la recolección de datos de pre-disparo, del registrador de eventos, de la memoria de rastreo y de estadísticas. Antes de la emisión del disparo, el SR-469 tomará una instantánea de los parámetros medidos, los que serán almacenados con la causa del disparo. Estos datos previos al disparo pueden ser incorporados utilizando la tecla [NEXT] antes de la reposición, o revisando los datos del último disparo en los Valores Actuales. El sistema de registro del SR-469 puede almacenar hasta cuarenta eventos con hora y fecha, incluyendo datos previos al disparo. Cada vez que un disparo ocurre, el SR-469 almacenará en memoria ocho ciclos antes y ocho ciclos después del disparo, para todas las cantidades de AC tomadas. Los contadores de disparos registran el número de ocurrencias de cada tipo de disparo. Valores mínimos, máximos de RTD y entradas analógicas, también son registrados. Estas características permitirán que el operador determine con certeza y rapidez, la naturaleza del problema.

La medición de potencia está incluida en el SR-469 como una característica fija, a través del panel frontal o de los puertos de comunicación. El SR-469 está equipado con tres puertos de comunicaciones completamente funcionales e independientes. El puerto en el panel frontal RS-232 puede ser utilizado para la parametrización del SR-469, interrogación local o control y mejoramiento del programa residente del SR-469. El puerto del Computador RS485 puede ser conectado a PLC, o a programas de interface hombre-máquina para computadores PC. El puerto Auxiliar RS485 puede ser utilizado para

redundancia o interrogación y/o control simultáneo de un programa PLC, o PC. Hay también cuatro salidas de transductor de 4-20 mA que pueden ser asignadas a cualquier parámetro medido.



Figura 2.1g Vista frontal del Multilin SR-469.

En el esquema objeto de estudio a través de las posibilidades que presenta el SR-469, existen disparos por protecciones que actúan directamente sobre el interruptor siemens (52), a través de un contacto auxiliar denominado (R1) del propio Multilin, por otra parte existe habilitado otro contacto auxiliar R2, el cual está habilitado como disparo por baja frecuencia del SEN (57.5 Hz) al VFD a través de una entrada digital en el propio VFD.

Se toman valores de medición de tensión en delta abierta y corriente en conexión estrella aterrada antes del VFD, para el cálculo de parámetros eléctricos que sirven para la operación de las protecciones, así como los valores de temperatura (RTD) en el enrollado del motor y en sus cojinetes para la protección por sobretemperatura en el mismo.

A su vez existe un circuito de control para el cierre y desconexión del interruptor Siemens, que posee señalización de circuito cerrado y abierto a través de lámparas de señalización, comandadas a través de contactos auxiliares del propio interruptor.

En el esquema existe un sistema de antibombeo que no permite recierres del interruptor con la operación manual del operador en el instante del cierre manual del mismo. El cubículo del interruptor posee cuatro resistencias para mantener el mismo sin humedad de 75 W cada una, alimentada con una tensión de 120 VAC.

El SR-469, censa a través de contactos auxiliares del interruptor Siemens y de contactos de fin de carrera del propio cubículo la posición del mismo, ya sea en posición conectado a barras, en posición de prueba o fuera de cubículo.

La alimentación del SR-469 se realiza con una tensión de 110 V DC, proveniente de una fuente segura (UPS), unidad ininterrumpida de potencia, la cual genera 120 V AC y la misma es rectificadora a través de un puente rectificador de onda completa.

2. Transformadores de voltaje de control. Destinados para mediciones de potencial, de los cuales se emplearon de distintas relaciones:

- ✚ Transformador de potencial, modelo Moeller de 480V a 20 VAC, 60 Hz, 150 VA, modelo FT-8481 para la medición del Multilin SR-469.
- ✚ Transformador de potencial para el control, modelo Moeller de 480V a 500 VAC, 60 Hz, 250 VA, modelo FT-8481 para el control en el variador de velocidad.

3. Transformadores de corrientes. Destinados para la medición de corriente, de los cuales se emplearon de distintas relaciones:

- ✚ Transformador de corriente con relación de 600/5A, para la medición del SR-469.
- ✚ Transformador de corriente para la medición del centro de estrella aterrada en el transformador de fuerza, con relación de 150/5 A, para señal al Multilin SR-469.
- ✚ Transformador de corriente Allen – Bradley, para la medición de la fase C del motor eléctrico, con relación de 75/5 A, 60 Hz, 60 KV max, fabricado en Canadá, para la comunicación con el Citect (programa SCADA).

4. **Interruptores de control.** Destinado para alimentar todo el control tanto en el cubículo del Multilin SR-469, así como en el cubículo del variador de velocidad, de los cuales se utilizaron de diferentes capacidades denominados FAZNC4, FAZNC10, FAZNC2, FAZNC1, FAZNC15.
5. **Fusibles de control.** De 2 A para la protección del esquema de control del cubículo del SR-469 (transformador de potencial) y en el cubículo del variador de velocidad.
6. **Sensores de temperatura.** Situados en el motor eléctrico (RTD, detectores de resistencia por temperatura), destinados para medir la temperatura de los enrollados y de los cojinetes del propio motor de 200 kW (Modelo PT100).
7. **Conductores de control.** Se utilizaron de varios tipos, tales como números (12 y 14 AWG), con recubrimiento.

Ajustes de los componentes del accionamiento eléctrico.

El sistema de estudio consta de 3 equipos los cuales presentan ajustes para la protección y el correcto funcionamiento de todo el accionamiento.

1. Relé Multilin SR-469.
2. Interruptor de alimentación del variador de velocidad.
3. Variador de velocidad.

Ajustes del Multilin SR-469.

El SR-469, es un equipo de protección destinado específicamente para motores, el cual presenta gran facilidad a la hora de su programación, además que es adaptable a cualquier sistema eléctrico industrial.

A continuación se representan los parámetros que tiene activo el Multilin SR-469 específicamente para el sistema del accionamiento de la bomba de licor (194-PU-2).

Tabla 2.1b Parámetros activados el Multilin SR-469 para la protección del motor.

Nº	Parámetros	Según norma ANSI	Ajuste
1	Ajuste de corriente		600/5 A
2	Ajuste de voltaje		4.00:1 (480/120) V
3	Protección térmica	51	1.01*FLA Curva. Estándar (Ver catalogo del SR-469).
4	Protección de sobrecarga	51	Curva. #. 4 (Ver catalogo SR-469).
5	Disparo por cortocircuito	50	5.8*TC, t=0 s
6	Desbalance por corriente	46	Al 25 %, t=3 s
7	Falla de tierra	50G	0.66*TC, t=0 s
8	Protección por RTD #.1, estator	49	130 °C como alarma 150 °C como disparo
9	Protección por RTD #.2, estator	49	130 °C como alarma 150 °C como disparo
10	Protección por RTD #.3, estator	49	130 °C como alarma 150 °C como disparo
11	Protección por RTD #.7, cojinete	38	95 °C como alarma
12	Protección por RTD #.8, cojinete	38	95 °C como alarma
13	Bajo voltaje	27	0.85*Un como alarma
14	Protección por baja frecuencia	81	57.5 Hz, t=0 s
15	Protección por alta frecuencia	81	70.0 Hz, t=0 s

Todos los disparos de protección del Multilin SR-469 actúan directamente sobre el interruptor principal Siemens de 2000 A, exceptuando el disparo por baja o alta frecuencia que tiene acción directa sobre el variador de velocidad.

Ajustes del interruptor de alimentación al variador de velocidad.

Este interruptor presenta una unidad de protección ante fallas por cortocircuito ajustadas a los siguientes valores.

Corriente nominal ajustada.....700 A.

Valor de disparo por corto circuito..... $16 \cdot I$ (ajuste) = 11 200 A

Variador de velocidad F7, Yaskawa.

Un variador de frecuencia, VFD por sus siglas en inglés (Variable Frequency Drive) o bien AFD (Adjustable Frequency Drive), es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna, por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Otra forma de cambiar la velocidad del motor sería cambiando el número de polos del motor, aunque esta técnica resulta ineficiente ya que habría que cambiar las características físicas del motor.

El principio de funcionamiento del variador de velocidad consiste en convertir el voltaje de CA a un voltaje de CD por medio de un puente rectificador trifásico compuesto por seis diodos para posteriormente convertir ese mismo voltaje de CD a un voltaje de CA por medio de un puente inversor trifásico compuesto por seis transistores de potencia IGBT, los cuales controlan el voltaje de CA variando su frecuencia.

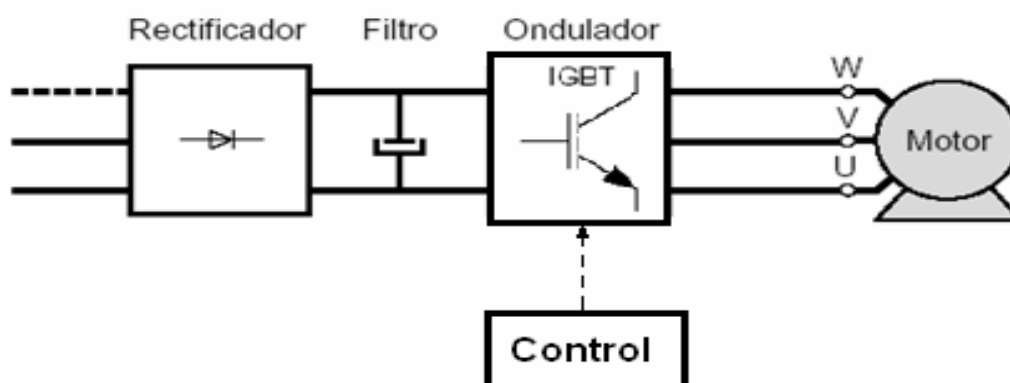


Figura 2.1h Esquema simplificado de un VFD.

Los variadores de velocidad YASKAWA, serie F7 (Anexo 2.1b), vienen generalmente configurado por el fabricante a sistema de dos vías, donde el terminal #1 viene configurado como Forward-Run-Stop (marcha – adelante - paro) y el terminal #2 en Reverse Run-Stop. (Marcha en reversa/paro).

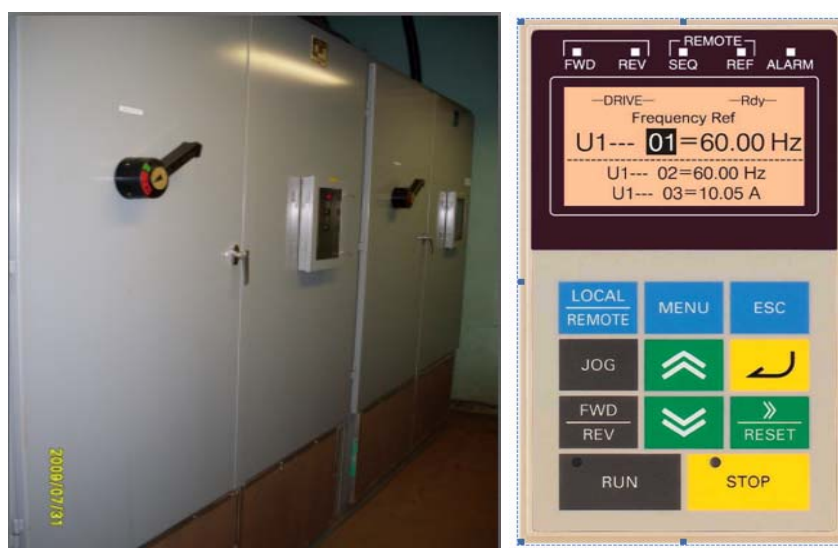


Figura 2.1i Vista exterior del cubículo del VFD, con el operador digital.

En la mayoría de las instalaciones el sistema de control utilizado es el de tres vías, por lo que el variador debe ser programado para trabajar en sistema de tres hilos, donde convierte el terminal #1 en comando de RUN (marcha), el terminal #2 en comando de STOP (paro) y el terminal #5 en selección forward (adelante) o reverse (reversa), este último forma parte de unos de los terminales programables del tres al ocho, el cual debe ser modificado y programado según nuestras condiciones necesarias de operación.

El esquema actual del variador de velocidad en el accionamiento de la bomba 194-PU-2 de licor, además de poseer las características anteriores, también presenta un sistema de señalización a través de una salida digital denominada M1 y M2, las cuales están programadas para la activación con el comando de arrancada del accionamiento, que energiza un relé del tipo DIL R22, el cual a través de sus contactos auxiliares indica la condición de marcha o parada del mismo.

Además tiene dos salidas analógicas programadas una para la señalización del porcentaje (%) de velocidad (rpm), del motor en un instrumento analógico, a través de una señal de 0 hasta 10 VDC, y otra configurada de la misma manera para la indicación de la señal en el sistema SCADA (Citect), la cual se suministra hacia un PLC modelo S7-300, con una señal de 4 a 20 mA.

El VFD presenta una entrada analógica es la encargada de controlar la velocidad del motor cuando el mismo se encuentra en modo remoto (habilitado para su control exterior), que es

controlada vía PC - PLC S7/300 – VFD, con un rango de variación desde 4 hasta 20 mA. Otra de las salidas digitales denominadas M3 – M4, está habilitada para la operación de cerrada con el comando de parada, que manda a cerrar de forma casi instantánea la electroválvula, para evitar retorno del licor.

Las entradas digitales (ocho en total), están habilitadas de la siguiente forma:

1. Entrada #.1 (S1), para la marcha del accionamiento.
2. Entrada #.2 (S2), para la parada del VFD.
3. Entrada #.3 (S3), Disparo exterior, activada a través del Multilin SR-469, por causa de baja frecuencia en el sistema (57.5 Hz).
4. Entrada #.4 (S4), Resetear del VFD, ante fallas.
5. Entrada #.5 (S5), Parada de emergencia.
6. Entrada #.6 (S6), no se usa.
7. Entrada #.7 (S7), no se usa.
8. Entrada #.8 (S1), Cambio del modo de operación del VFD, Local / Remoto.

El VFD presenta un sistema de enfriamiento a través de ventiladores acoplados en el disipador que se encuentran fijados los módulos de fuerza a través de IGBT y un reactor de entrada, para la amortiguar los armónicos.

Alarma y fallas más comunes del variador de velocidad.

Esta sección describe las funciones de fallo y alarma del convertidor. Incluyendo la detección de alarmas, de errores de programación del operador y de errores de auto-chequeo. Cuando el convertidor detecta un fallo, se opera la salida de contacto de fallo y la salida del convertidor se pone en OFF, lo que causa que el motor marche libre hasta su detención. (El método de detención puede ser seleccionado para algunos fallos). Se visualiza un código de fallo en el Operador Digital, el cual brinda la información necesaria para la búsqueda de la misma (ver manual de variador de velocidad F7 pág.6-2).

Ajustes de programación del variador de velocidad F7.

El F7 es un poderoso controlador para motores de C.A. trifásicos, pensado para accionar con múltiples ventajas, desde las más sencillas aplicaciones industriales como pueden ser

bombas y ventiladores hasta los más sofisticados y extremos requerimientos como comunicación en red e izaje de cargas respectivamente.

Todo esto es posible gracias a la flexible e inteligente plataforma del F7, desarrollado para servicio normal y pesado, cuatro modos de control, opciones de comunicación en red, programa de aplicaciones específicas y una gran variedad de posibilidades de entradas/salidas estándar u opcionales.

El F7 se presenta programado de fábrica y listo para funcionar. Para una mayor simplicidad y claridad, el indicador alfanumérico es de cinco líneas por dieciséis caracteres con lectura seleccionable entre siete idiomas. El teclado es intuitivo y dispone de función para copia de parámetros mediante la cual se pueden repetir parámetros de un equipo a otro. Para simplificar la programación los parámetros se han separado en dos grupos, inicio rápido y funciones avanzadas. Mediante el programa Drive Wizard, disponible sin costo, es posible comandar el F7 desde una PC, programar, monitorear, y graficar.

El F7 se ha diseñado para soportar ambientes industriales, es muy sólido y confiable. Coberturas opcionales permiten su aplicación en ambientes agresivos.

Esta es la generación más reciente de este producto a nivel mundial, presentando varias innovaciones, sistema inventado y patentado por Yaskawa, que permite desacelerar cargas de elevada inercia sin necesidad de utilizar el frenado mediante resistencias.

Todo lo que se puede pretender de un equipo de esta naturaleza el F7 lo tiene, control V/f, V/f a lazo cerrado, vectorial a lazo abierto y vectorial a lazo cerrado, autosintonía, conectividad, coordinación con otros equipos y un amplio rango de opciones configurables. Para nuevas instalaciones o para actualización de máquinas, en control de motores, sin duda el F7 es la herramienta de trabajo industrial más poderosa del mercado, perfecto para cualquier aplicación convencional y también para las no convencionales.

Tabla 2.1c Diagrama con los parámetros más importantes para la programación del F7.

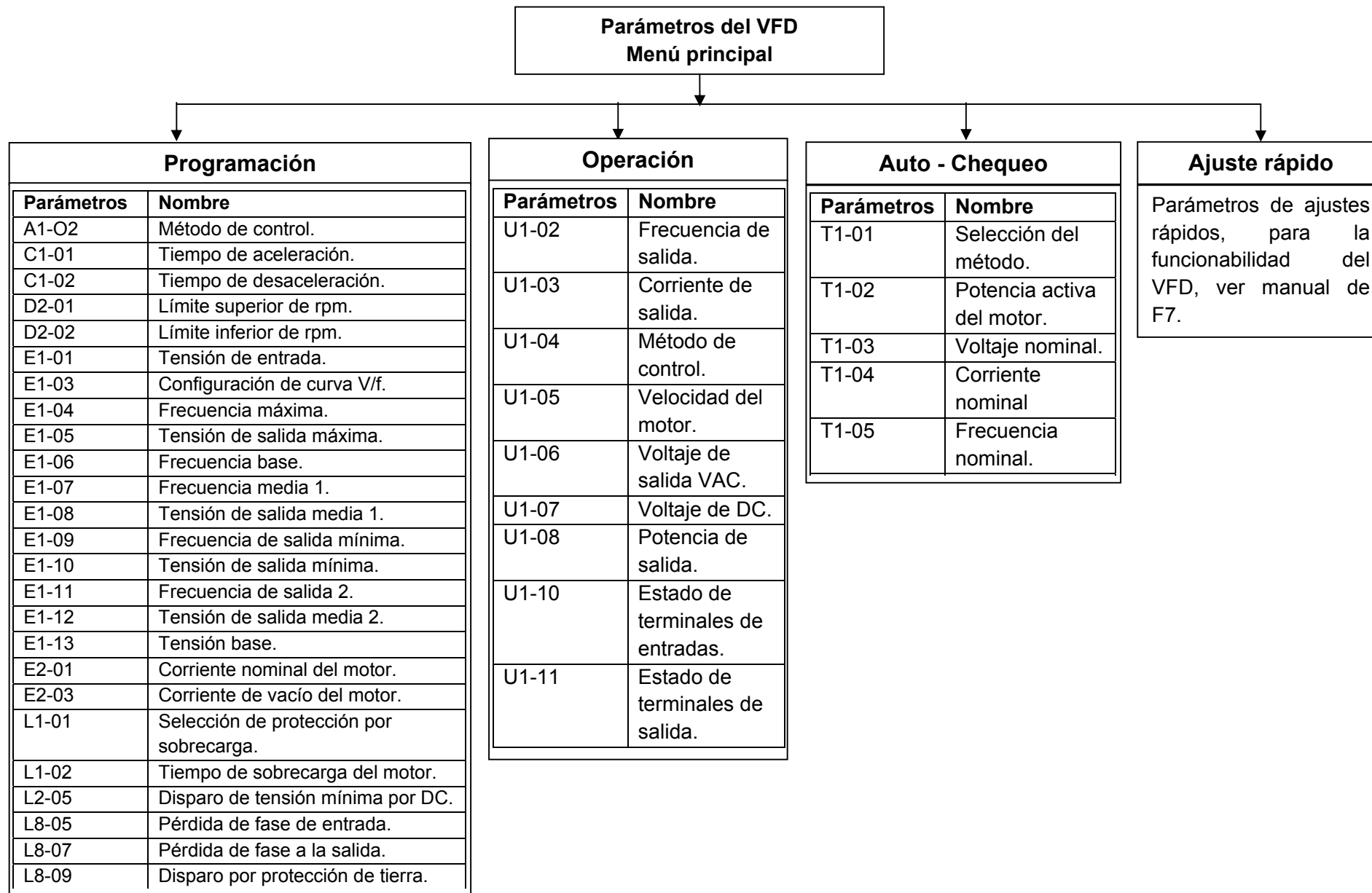


Tabla 2.1d Ajustes de los parámetros esenciales del variador de velocidad F7, Yaskawa.

Parámetros	Nombre	Ajuste
A1-02	Método de control.	0 (V/f)
C1-01	Tiempo de aceleración.	10 s
C1-02	Tiempo de desaceleración.	20 s
D2-01	Límite superior de rpm.	100 %
D2-02	Límite inferior de rpm.	60 %
E1-01	Tensión de entrada.	480 V
E1-03	Configuración de curva V/f.	F (V/f)
E1-04	Frecuencia máxima.	60 Hz
E1-05	Tensión de salida máxima.	370 V
E1-06	Frecuencia base.	45 Hz
E1-07	Frecuencia media 1.	40 Hz
E1-08	Tensión de salida media 1.	300 V
E1-09	Frecuencia de salida mínima.	36 Hz
E1-10	Tensión de salida mínima.	250 V
E1-11	Frecuencia de salida 2.	50 Hz
E1-12	Tensión de salida media 2.	350 V
E1-13	Tensión base.	320 V
E2-01	Corriente nominal del motor.	350 A
E2-03	Corriente de vacío del motor.	104 A
L1-01	Selección de protección por sobrecarga.	1 (enfriamiento normal)
L1-02	Tiempo de sobrecarga del motor.	8 min
L2-05	Disparo de tensión mínima por DC.	380 VDC
L8-05	Pérdida de fase de entrada.	1 (pérdida de una fase)
L8-07	Pérdida de fase a la salida.	1 (pérdida de una fase)
L8-09	Disparo por protección de tierra.	1 (Habilitado)

2.2 Análisis de los trabajos precedentes relacionados con el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotro Alba.

Trabajos precedentes:

El sistema eléctrico de las bombas de licor 194-PU-2 fue reconstruido en **febrero del año 2002**. La reconstrucción constituyó en:

1. Sustitución del motor eléctrico Siemens de 480 VAC por un motor de 4160 V Loher de 200 HP.
2. Sustitución del interruptor Siemens de 480 V, 800 A, ubicado en la pizarra de distribución general de 480 V, por una celda de 4160 V equipada con fusibles y arrancador magnético al vacío Allen Bradley para motores de 350 HP.
3. Instalación de protecciones electrónica digital, Multilin SR-469, para protección de motores.
4. Sustitución de los cables de fuerza, 3c # 2 AWG, TECK 90, 5000 V, conductores de cobre, con forro exterior de PVC (PVC Poli Vinil Cloruro), con blindaje metálico de aluminio y aislamiento del conductor XLPE (Poli Etileno reticulado).

A partir de noviembre del 2004 se comenzaron a instalar variadores de velocidad en la bomba 194-PU-2 del sistema de bombeo de licor de la Planta de Sulfuros, como consecuencia de la ejecución del proyecto titulado: "Proyecto 100087, Fase III, mejoras del sistema de alimentación Autoclave de Sulfuros".

Desde la fecha señalada hasta el momento han ocurrido tres fallas de cortocircuitos monofásicos del conductor de media tensión 4,16 kV, que han provocado la paralización de la autoclave #.2, y consiguiente la pérdida del 25% de la producción de sulfuro de Níquel + Cobalto.

También, se han presentado problemas en dos ocasiones con el transformador de medición de corriente de la bomba 194-PU-2, donde el fabricante aludió como causa posible de estos problemas la presencia de armónicos de alta frecuencia en el sistema, generados por los propios VFD.

Observaciones:

1. A diferencia de otros sistemas donde existen instalados (VFD), en esta instalación en lugar de un reactor (filtro normalmente utilizado para atenuar el efecto nocivo de los armónicos de alta frecuencia), existe un transformador de potencia 400 kVA elevador de voltaje de 480 a 4160 V.
2. En los tres cortocircuitos el conductor de fuerza ha presentado apariencia similar a la mostrada en la figura 2.2a.

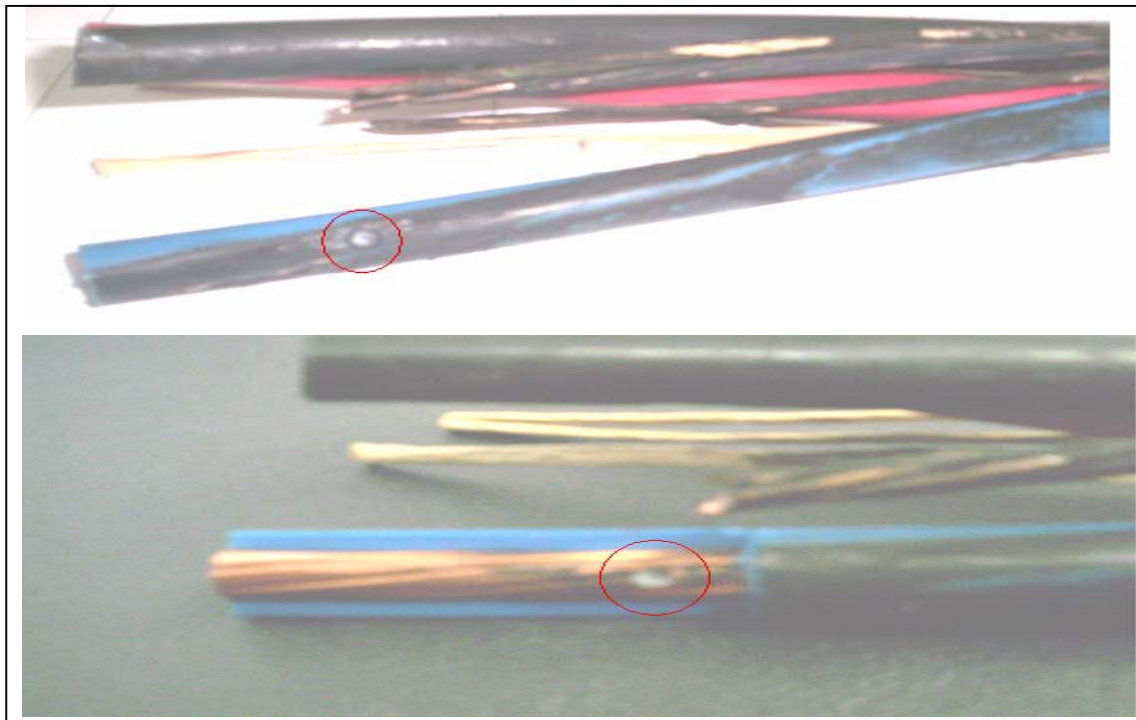


Figura 2.2a Conductores dañados por los cortocircuitos monofásicos.

Como puede verse no se aprecian huellas de sobrecalentamiento ni en el conductor ni en el aislamiento. La falla detectada en el cable, aparenta ser un fallo del aislamiento del conductor por alto voltaje.

Recomendaciones de los trabajos precedentes.

1. Hacer mediciones de niveles voltaje y armónicos del sistema tanto en la parte de 480V como en la de 4160V.
2. Hacer pruebas de alto voltaje, según especificaciones, al conductor de fuerza averiado.
3. Variar el cambia Tap del transformador de fuerza, ponerlo en posición **E**, 95%,3925 V, para amortiguar las sobretensiones, de ser posible medir voltaje a la salida del transformador de fuerza, por el lado de alta, el voltaje no debe exceder los 3925 V.
4. Variar el parámetro prevención ante vibraciones, variable n1-02 desde 1.00 hacia el 0.00 y medir voltaje a la salida de 480 V de VFD, durante los periodos de cambio de carga de la bomba. El voltaje de salida no debe exceder los 460 V.

A raíz de las fallas ocurridas en el accionamiento eléctrico y teniendo en cuenta las pérdidas aportadas a la Empresa se tomaron varias acciones sobre el accionamiento que tendieron a mejorar algunas funcionalidades del mismo, según se describieron anteriormente, los mismos aportaron en la funcionabilidad del accionamiento eléctrico, amortiguando (no en gran medida) los picos de sobre tensión generados, lo que no fue una solución definitiva, debido a que en la actualidad se siguen generando sobretensiones por encima de los 5000 V, lo que sigue siendo perjudicial para el accionamiento.

Acciones para cambio de parámetros.

1. Cambio de ajuste en el variador de velocidad F7.

Parámetro	Actual	Ajustar
N1-02	1,00	0,00

2. Limitar el variador de velocidad por tensión a la salida a 370 VAC, para amortiguar las sobretensiones.

Parámetro	Actual	Ajustar
E1=04	460 V	370 V

Los parámetros de ajuste del VFD que pueden influir en este problema son:

1. **Compensación del torque.** Este parámetro está deshabilitado en la bomba 194-PU-2.
2. **Compensación del deslizamiento.** Deshabilitado.
3. **Prevención ante vibraciones.** Ajustado a 1.00.

Tabla 2.2a Valoración los trabajos precedentes

Logros alcanzados	Logros no alcanzados
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se evaluó el efecto del cortocircuito monofásico en el conductor de media tensión. 2. El personal técnico se interesó por dar solución al problema planteado al tomar las siguientes medidas: <ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de parámetros del variador de velocidad para la limitación por tensión del VFD (a 370 VAC de salida). • Reducción de tensión en el transformador de fuerza al mínimo (Tap E, 3952 V). • Reemplazó del cable afectado por otro de iguales características en buen estado técnico. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No se realizaron mediciones de variables eléctricas por el lado de media tensión 4,16kV, para identificar con exactitud las causas que originan los cortocircuitos monofásicos. 2. Se realizaron ajustes que amortiguaron los efectos (de alguna manera), pero afectaron negativamente en la eficiencia del accionamiento, debido a que se limitó el VFD y el transformador de fuerza por tensión. 3. No se le dio solución definitiva al problema de los cortocircuitos monofásicos a pesar de las acciones llevadas a cabo.

2.3 Investigación de las causas que originan los cortocircuitos monofásicos en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.

En la actualidad los sistemas de monitoreo son muy diversos, para censar y realizar mediciones en tiempo real de variables tanto eléctricas, así como de variables de procesos industriales, siendo de vital importancia para la toma de decisiones ante perturbaciones de las mismas.

Una de las herramientas para ello, son los programas destinados para estos fines, basado en la toma de una muestra de la variable a través de diferentes vías de comunicación, en este caso a través del sistema SCADA, con la comunicación del Multilin SR-469, y de los equipos analizadores de redes (PQM. Por sus siglas en inglés Power Quality Meter).

El autor de esta tesis participó de manera directa, junto a un equipo de especialistas, en el montaje de un sistema de monitoreo con un analizador de redes del tipo Multilin, modelo PQM, para investigar las causas que originan los cortocircuitos monofásicos en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros de la Empresa Pedro Sotto Alba.

Esquema del experimento para monitoreo.

A continuación se representa el esquema monolineal de monitoreo, que se concibió para realizar las mediciones de las variables eléctricas en la bomba de licor 194-PU-2, de la Planta de Sulfuros.

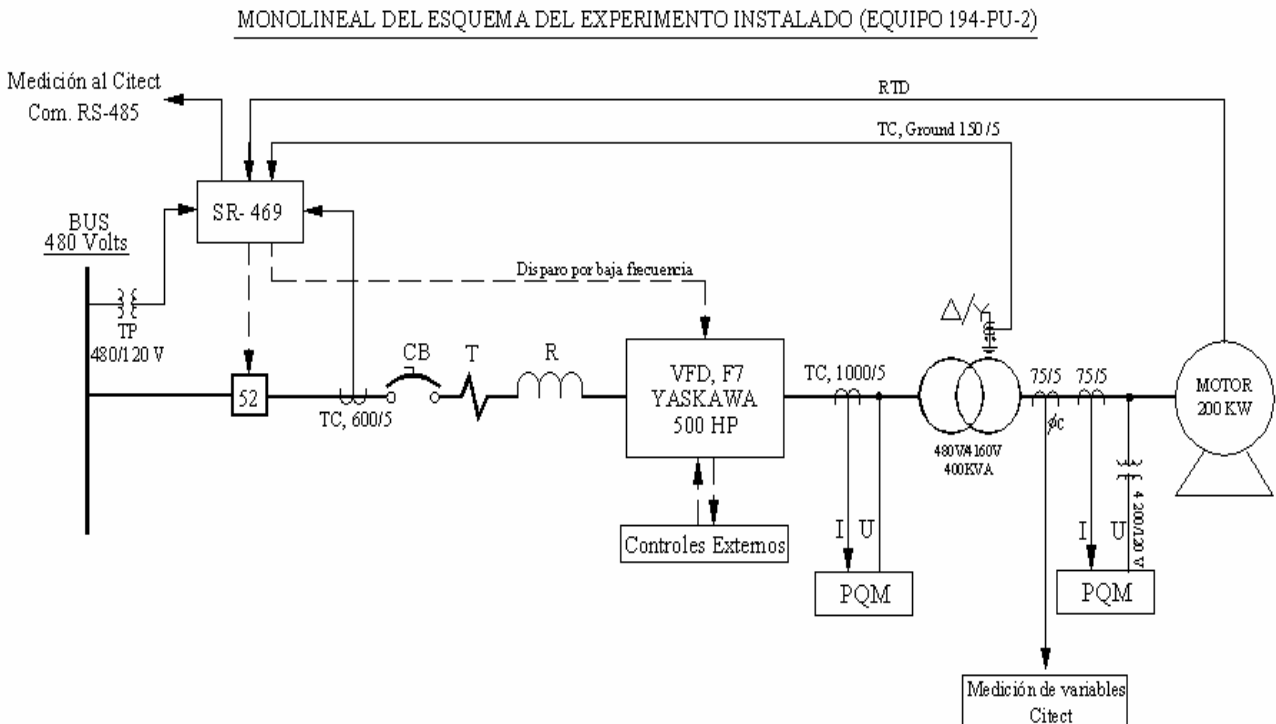


Figura 2.3a Esquema de monitoreo para la evaluación de la red del accionamiento

Descripción del sistema de monitoreo.

Teniendo en cuenta la complejidad del esquema, el cual presenta varios puntos de vital importancia para el estudio de la red, se instalaron dos analizadores de redes, reflejado en el monolineal, uno de ellos fue instalado en la salida del variador de forma permanente con la instalación de transformadores de corrientes y de potencial (TC / TP) para censar las variables del variador de velocidad F7 (Anexo 2.3a), y el otro en la salida del transformador de fuerza (en este caso una PQM portátil), a través de la medición directa a través de sus propios sensores de medición (TP / TC).

El tercer punto de medición se basó en el Multilin SR-469, a través de la base de datos interna que presentan los mismos, con la comunicación del sistema SCADA (Citect) de la Empresa.

Partes del sistema de monitoreo.

Las partes que componen el sistema de monitoreo instalado fueron:

- ✚ Multilin SR-469.
- ✚ PQM portátil.
- ✚ PQM permanente.

Descripción del monitoreo a través de Multilin SR-469.

Como se ilustra en la figura 2.3b el Multilin SR-469 censa los valores que pertenecen a la alimentación del cubículo del variador de velocidad, en este caso a una tensión de 480 V, tiene la opción de medir diversas variables eléctricas a través la opción interna (Actual Valores).

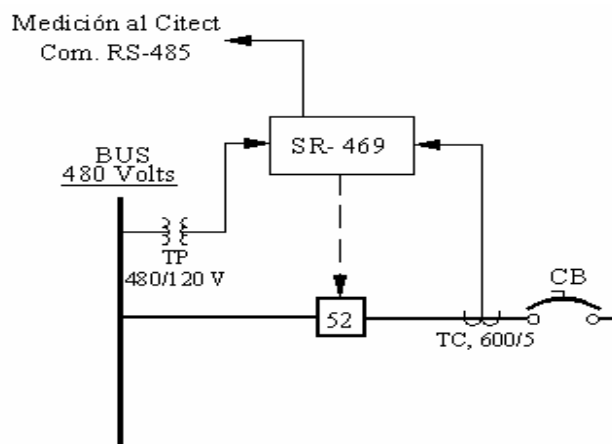


Figura 2.3b El Multilin SR-469 en el sistema de monitoreo

El Multilin censa los valores a través de transformadores de corriente de 600/5 A, y transformadores de potencial de 480 a 120 VAC. La comunicación con el sistema SCADA (Citect), se realiza a través de los puertos auxiliares RS-485 del propio Multilin, que se comunica con cable profibus, con un convertidor de RS-485 a ethernet (Nport 4030) (figura 2.3c).

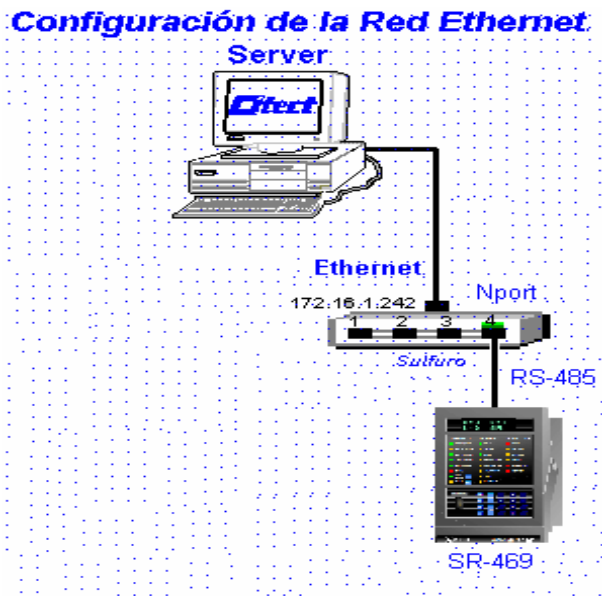


Figura 2.3c Comunicación del Multilin SR-469 mediante la Red Ethernet

Descripción del monitoreo a través de PQM portátil.

Entre los componentes analizadores de redes se encuentran los PQM (Por sus siglas en inglés Power Quality Meter), está destinado al análisis y captura de variables eléctricas, en este caso se utilizó para las mediciones de las variables en la salida del variador de velocidad, perteneciente al laboratorio eléctrico, la misma es de uso portátil y puede ser movida con facilidad. Esta presenta ganchos de medición (transformadores de corrientes), de 1000/5 A, y puntas para la medición de tensión, hasta los 600 V.

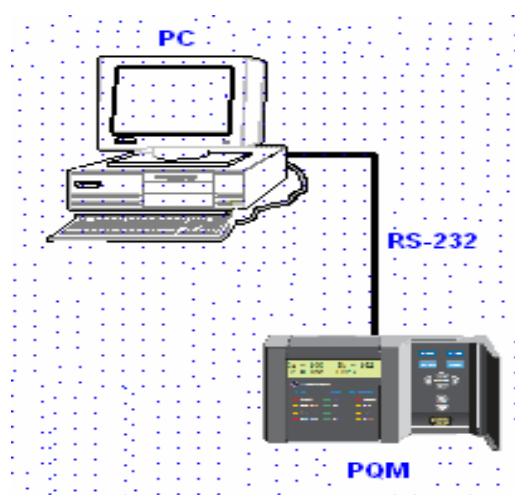


Figura 2.3d PQM portátil usada en el monitoreo

Descripción del monitoreo a través de PQM permanente.

La PQM permanente es de las mismas características que la PQM portátil, sólo que en este caso fue fijada a la pared en una caja PVC (plástica), y censa los valores de medición en la salida del transformador de fuerza de 400 kVA (alimentación al motor), con transformadores de corrientes de 75/5 A y transformadores de potencial de 4 200/120 V.

Ajuste del sistema de monitoreo.

Con el apoyo del personal que labora en la parte de automática, se realizaron los ajustes de programación en el sistema SCADA (Citect) (figura 2.3e y 2.3f), de las diferentes variables a tomar por el lado de entrada al variador de velocidad, las cuales se realizaron a través de mapa de memoria del Multilin SR-469 (tabla 2.3a).

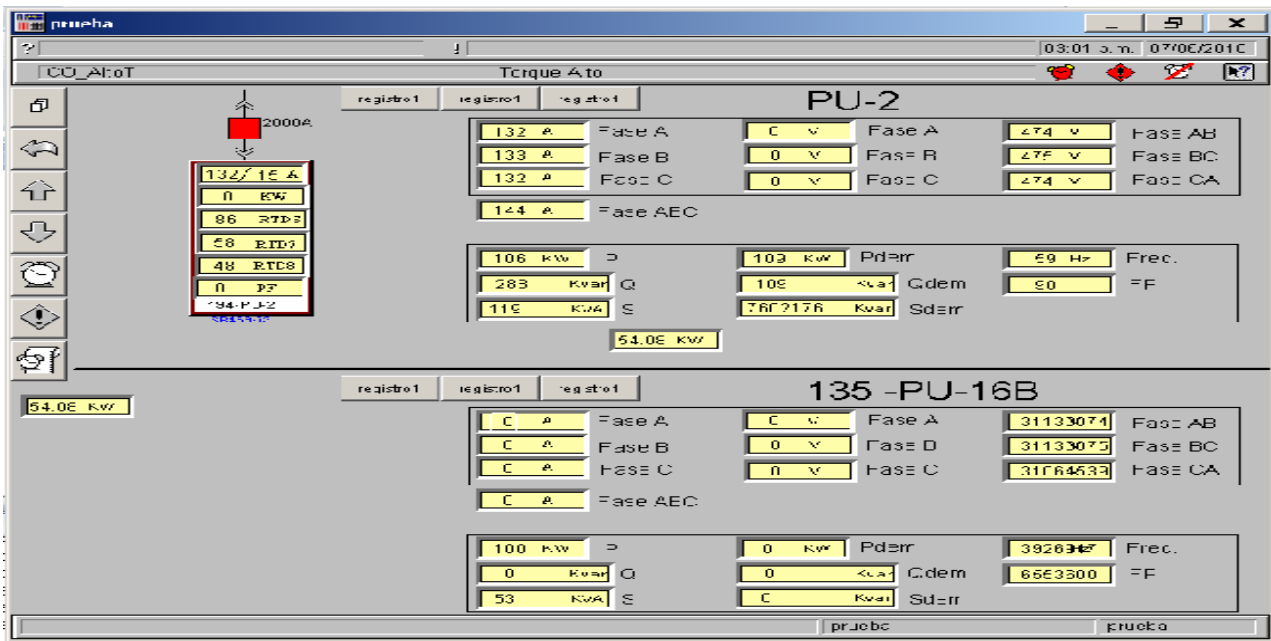


Figura 2.3e Registro de variables eléctricas en el Citect SCADA

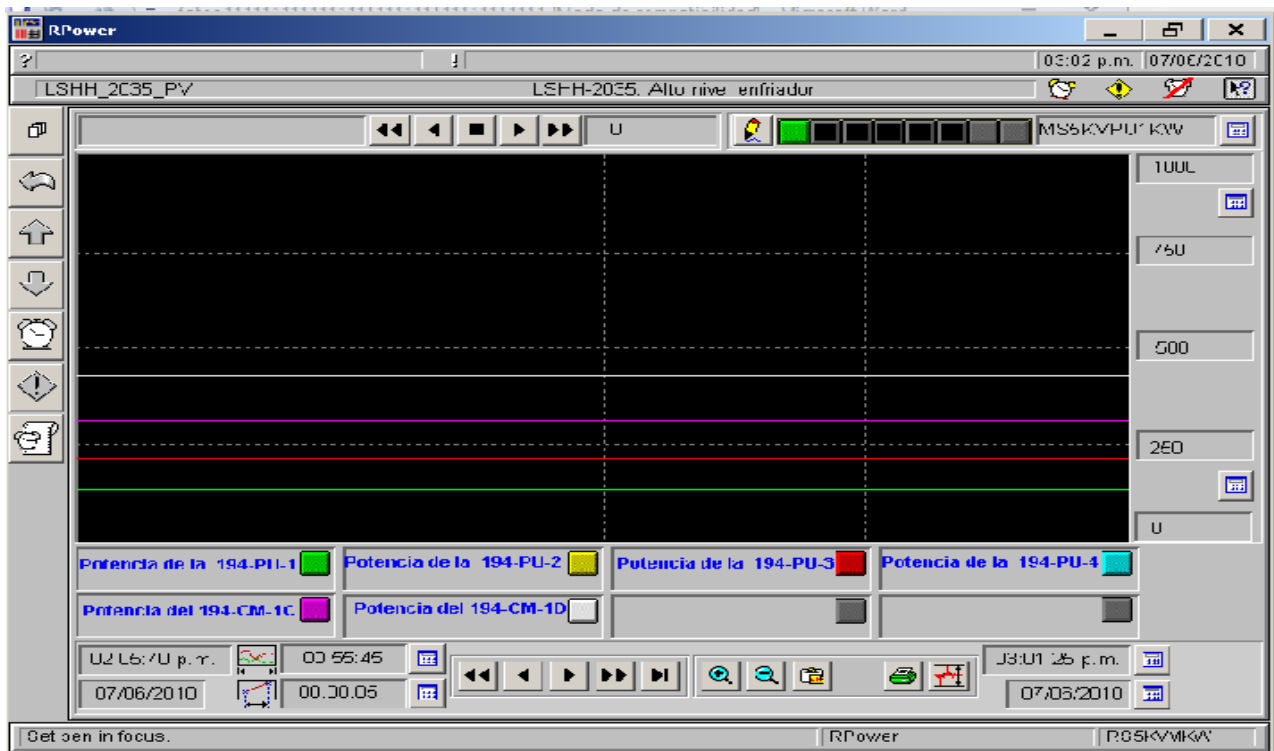


Figura 2.3f Gráficos en el Citect SCADA

Tabla 2.3a Mapa de memoria Multilin SR-469

SR-469						
#	Variables	I/O Device	Rango(Min/Max)	Unidades	Formato	Mapa de Mermoria
1	Ia	SR469Ia	0/100000	A	F9	0300
2	Ib	SR469Ib	0/100000	A	F9	0302
3	Ic	SR469Ic	0/100000	A	F9	0304
4	Idem	SR469Idem	0/100000	A	F9	0390
5	Uan	SR469Uan	0/20000	V	F1	0344
6	Ubn	SR469Ubn	0/20000	V	F1	0345
7	Ucn	SR469Ucn	0/20000	V	F1	0346
8	Uab	SR469Uab	0/20000	V	F1	0340
9	Ubc	SR469Ubc	0/20000	V	F1	0341
10	Uca	SR469Uca	0/20000	V	F1	0342
11	F	SR469F	0/12000	Hz	F3	0348
12	Fp	SR469Fp	-99/100	-	F21	0370
13	P	SR469P	-99999/99999	kW	F12	0371
14	Q	SR469Q	-99999/99999	kvar	F12	0374
15	S	SR469S	0/65535	kVA	F1	0376
16	Pdem	SR469Pdem	-50000/50000	kW	F12	0392
17	Qdem	SR469Qdem	-50000/50000	kvar	F12	0394
18	Sdem	SR469Sdem	0/50000	kVA	F1	0396

Ajuste de analizadores de redes PQM.

En el Ajuste de analizadores de redes PQM, la programación (Figura 2.3g y 3.3h) se realizó internamente a través de una PC, activándose una función para la medición constante en el tiempo de las variables a medir (Data log), que guarda las variables eléctricas asignadas.

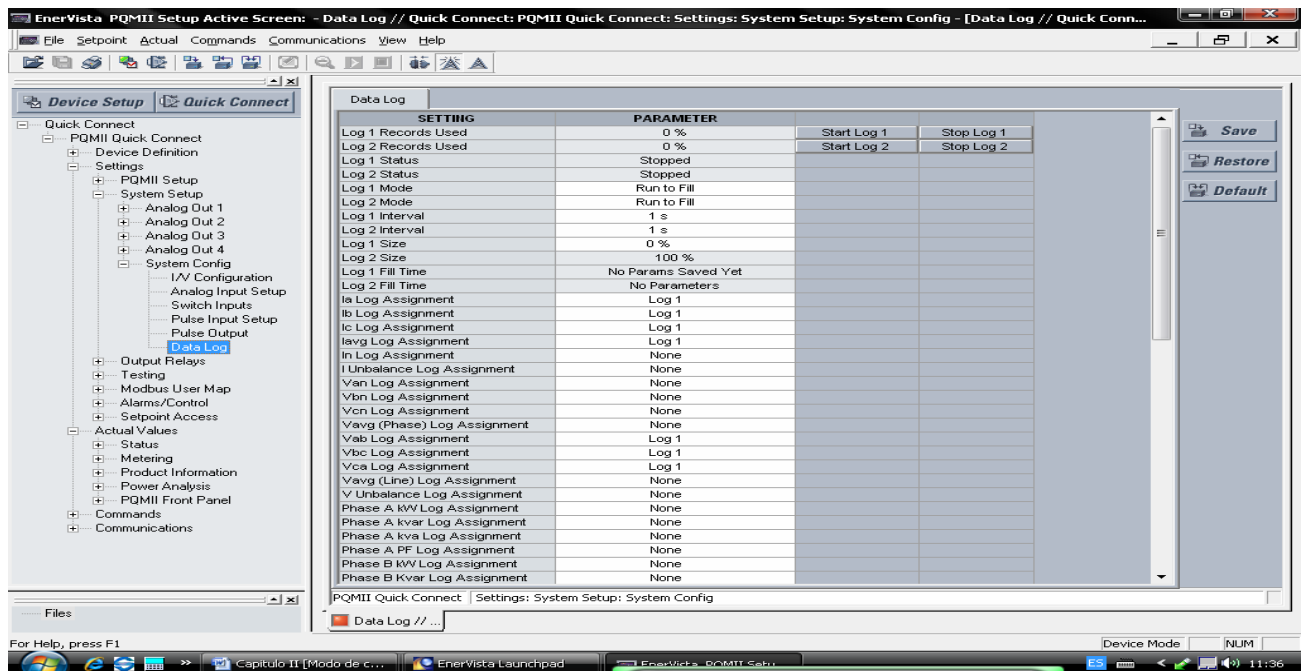


Figura 2.3g Software de la PQM para la activación de los parámetros.

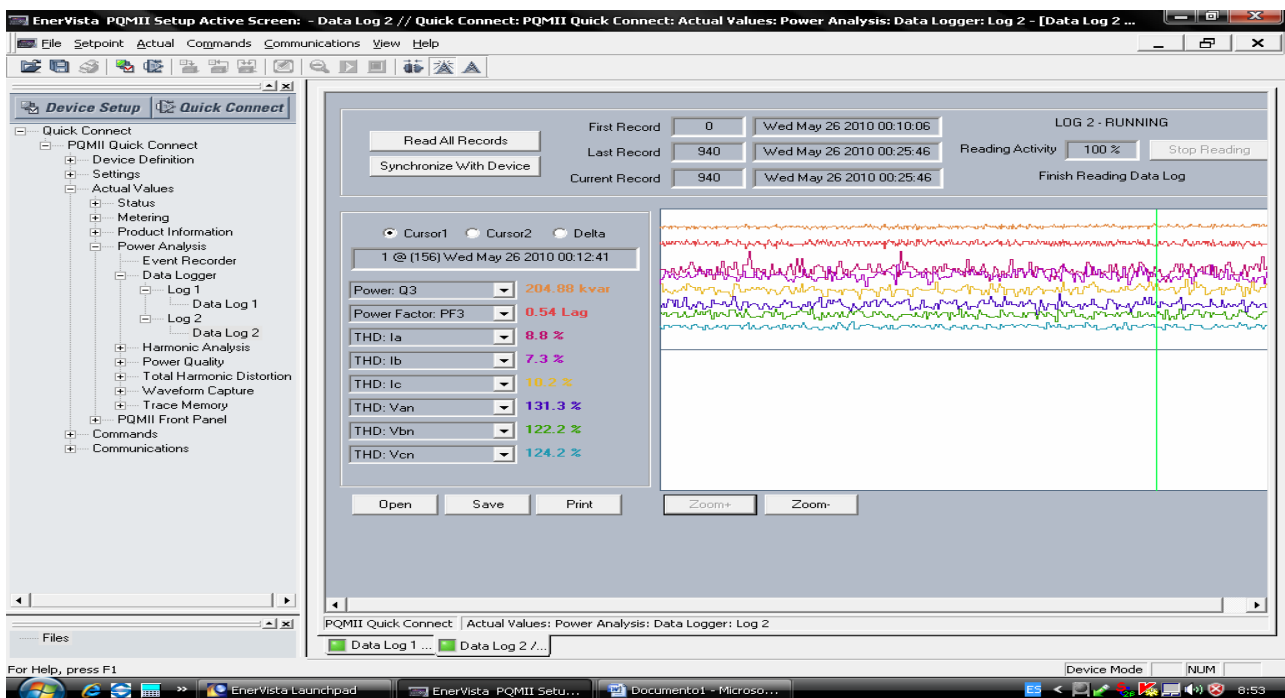


Figura 2.3h Ejemplo de la forma de obtención de los gráficos

Medición y análisis de las variables eléctricas del accionamiento eléctrico de la bomba 194-PU-2 de la planta de sulfuro.

La toma de mediciones eléctricas de todos los accionamientos eléctricos es de vital importancia para tomar acciones sobre operaciones y estudios de los mismos. En los Anexos de la tesis, se representan las bases de datos que se conformaron por las mediciones en los tres puntos previstos, las cuales brindan los comportamientos de las variables eléctricas. A continuación se realizarán los análisis de los datos obtenidos.

Análisis de la base de datos obtenida por el Multilin SR-469

Como se muestra en los Anexos 2.3b y 2.3c se realizaron 120 mediciones. Los parámetros eléctricos del accionamiento, se comportan dentro de los rangos normales, por lo que se evidencia que el mismo no presenta problemas por el lado de alimentación al variador de velocidad.

El día 25/09/2009, a las 2:07 PM, ocurre un disparo por falla a tierra registrado por el Multilin SR-469, perteneciente a la PU-2, el cual fue comprobado a través del megger, estando la fase (C) a tierra, lo que se dio a la tarea del cambio del conductor tipo teck 90, 2/0 AWG, 3C, el mismo fue megeado arribando a los resultados de la tabla 2.3b.

Tabla 2.3b Resultados reflejados por el monitoreo durante un cortocircuito

Fases	15 s (GΩ)	60 s (GΩ)
A vs tierra	96.6	133.46
B vs tierra	117	200
C vs tierra	125	190

Este equipo venía trabajando con valores de 28.75 A, a 2 817 rpm, con un valor del 78.27 %, y un bombeo de 1 220 gpm.

Análisis de la base de datos a la salida del variador de velocidad.

Como se muestra en los Anexos 2.3d y 2.3e, los parámetros eléctricos del accionamiento a la salida del variador de velocidad, presenta valores eléctricos que superan los parámetros normales, tales como son las tensiones de línea que llegan a alcanzar los 405 V AC, siendo un valor muy por encima del límite superior para lo cual fue ajustado el VFD (370 V AC máximo). Además se muestra una generación de armónicos por tensión de fase (THD (%)), que alcanzan los valores del 139.9%, que no son valores permisibles.

Análisis de base de datos en el transformador de fuerza por el lado de 4, 16 kV

En este caso (Anexos 2.3f y 2.3g), es importante reflejar los valores de sobretensión que se están generando en el accionamiento, oscilando desde los 3, 44 kV hasta los 9,35 kV, valores muy por encima de los valores nominales de los equipos instalados, como son: transformador de fuerza, conductor de alimentación y motor eléctrico.

Los valores de corrientes del motor se encuentran en parámetros normales teniendo en cuenta que el mismo tiene un factor de servicio de 1.15, lo que permite que se pueda trabajar hasta los 37.5 A.

Es necesario reflejar que estos valores de sobretensiones son generados por armónicos alcanzando valores del 517 % de THD, para los cuales no están diseñados los elementos asociados, provocando los cortocircuitos monofásicos en el conductor de media tensión.

Análisis general de la base de datos

En el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotro Alba se están generando armónicos de tensiones

perjudiciales provocados por el variador de velocidad (VFD), que alimenta al transformador convencional de (480/4160V), elevando las sobretensiones que conllevan a la pérdida del aislamiento del conductor de media tensión (5kV) en el transcurso del tiempo, y produciendo entonces los cortocircuitos monofásicos.

Problemas detectados en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor 194-PU-2

Los accionamientos eléctricos son una parte esencial de los procesos productivos de las industrias, por tal motivo un correcto diseño del esquema a implementar es una de las herramientas de más cuidado para su ejecución.

El objeto de estudio, el accionamiento de la bomba de licor 194-PU-2, es un equipo que por su importancia en su objeto industrial es calificado de 1^{ra} categoría, debido a su impacto en la producción de la industria del níquel, así como en la parte económica de la Empresa y del país, éste presenta un esquema que de forma general funciona correctamente, pero en ocasiones contribuye a posibles fallas no deseadas debido a las siguientes situaciones adicionales (además del tema de los armónicos):

- 1. Alimentación al variador de velocidad.** Los gabinetes de los VFD (variadores de velocidad), en la actualidad vienen diseñados para su alimentación directos a barras, ya que los mismos traen un interruptor de entrada con protección contra cortocircuitos, por tal motivo no se hace necesario un segundo interruptor, en nuestro caso el interruptor Siemens de 2000 A, lo que conlleva al aumento de posibles fallas y gastos por concepto de mantenimientos.
- 2. Protección del Multilin SR-469.** Este se encuentra situado por el lado de entrada del VFD, lo que no lo hace eficiente a la hora de hablar de protección al motor, que es en general el equipo fin del accionamiento eléctrico, el cual actualmente se encuentra ajustado a valores referidos.
- 3. Sobredimensionamiento del variador de velocidad.** Actualmente el motor instalado es de una potencia de 268 HP, para un VFD de 500 HP nominal.

4. Sobredimensionamiento del transformador de fuerza. Actualmente el transformador de fuerza es de una potencia de 400 kVA, éste sirve para aumentar el voltaje de salida del VFD a los valores nominales del motor.

5. Fallas monofásicas en conductores. Actualmente existen fallas monofásicas del conductor de media tensión (alimentación al motor), ocasionadas por altas tensiones.

Además de los problemas anteriores, han existido otras fallas ocasionadas directamente por la contaminación existente en la planta, las cuales han afectado tarjetas electrónicas, transformadores de corrientes (electrónicos) tanto en el VFD, así como las tarjetas del multilin SR-469. Además no se tiene una visualización de los parámetros eléctricos del motor, lo cual hace difícil un correcto análisis de posibles fallas, averías o manipulaciones del accionamiento en general.

Conclusiones del capítulo 2:

- El accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotro Alba, realiza un importante servicio dentro de la Empresa y está conformado principalmente por: un motor eléctrico que realiza el accionamiento, un transformador que alimenta al motor, el variador de velocidad y un Multilin para las protecciones.
- Durante los últimos años se han emprendido acciones en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), para disminuir al máximo la ocurrencia de cortocircuitos. Sin embargo no se le ha dado solución definitiva al problema de los cortocircuitos monofásicos a pesar de las acciones llevadas a cabo.
- Como resultado de un motitoreo riguroso en el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), se pudo comprobar la existencia armónicos, generados por el sistema de variación de la velocidad que producen las sobretensiones y éstos a su vez a los cortocircuitos.

Capítulo III: Propuesta de mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), de la Planta de Sulfuros, en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba y valoración técnico- económica.

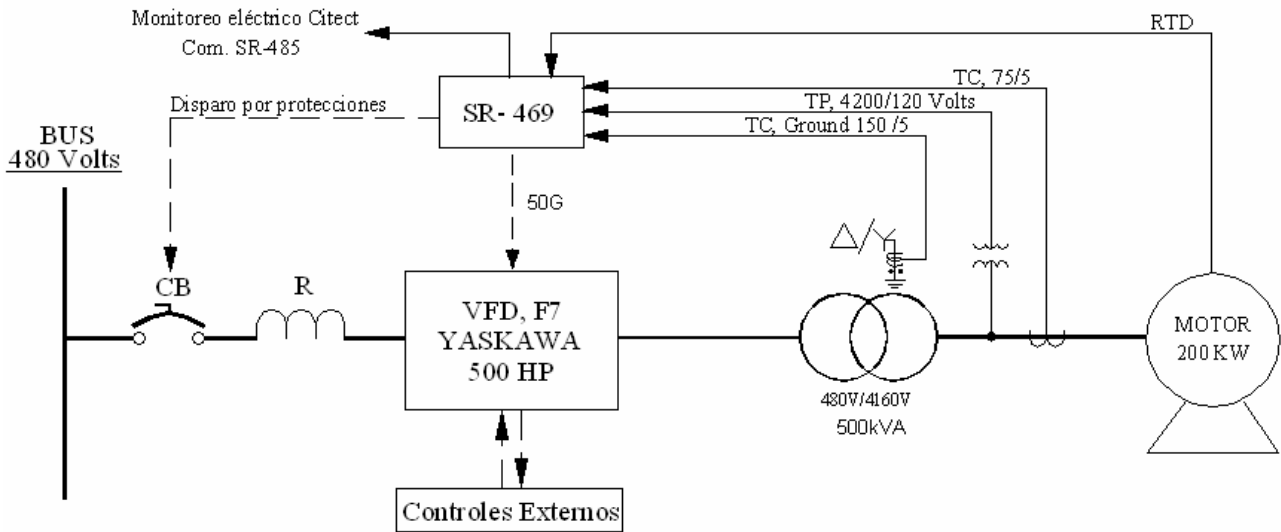
En este capítulo se tratará la propuesta de mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), de la Planta de Sulfuros, en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba y se realiza la respectiva valoración técnico-económica, donde se abordan las ventajas del esquema propuesto, así como la nueva programación del Multilin SR-469. Para representar la incidencia que tiene el efecto de una falla de cortocircuito monofásico en el conductor de media tensión (5 kV) que pueda ocurrir en el accionamiento de la bomba de licor (194-PU-2) en la planta de Sulfuro, se realizó un estudio económico del sistema en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba de Moa. Con el objetivo de mostrar el impacto que ocasiona las horas fuera de servicio de uno de estos accionamientos, se cuantifican las pérdidas actuales, así como el costo de la inversión y la relación costo beneficio.

3.1 Propuesta general del esquema mejorado.

El esquema mejorado (figura 3.1a) está conformado por un cubículo en el que se encuentran varios elementos de fuerza, en el que se incluye el interruptor general del cubículo que alimenta al variador de velocidad (VFD) F7, modelo Yaskawa (Anexo 3.1a), a través del reactor de línea. En los terminales de salida del VFD se conecta el transformador especial diseñado para trabajos con variadores de velocidad, el cual aumenta la tensión desde los 480 V hasta los 4160 V, que alimenta al motor eléctrico de 200 kW, de donde tomaría las señales de corriente y potenciales (TC / TP) el Multilin SR-469 (Anexo 3.1b) diseñado específicamente para la protección eléctrica de motores, además de censar las variables de temperatura a través de las RTD, tomando la muestra desde el estator y de los cojinetes.

La acción del Multilin SR-469, para las posibles fallas por protecciones eléctricas, se efectuaría directamente sobre el interruptor general del cubículo del variador de velocidad (VFD), a través de un contacto auxiliar denominado (R1) y los cortocircuitos monofásicos (50G) por el conductor de media tensión (4.16kV) un contacto auxiliar denominado (R2) a la entrada digital (S3) del VFD.

MONOLINEAL DE PROPUESTA A INSTALAR (EQUIPO 194-PU-2)



Nota: el disparo sobre el interruptor se realiza a través de un accesorio instalado internamente (bobina de disparo).

Figura 3.1a Accionamiento eléctrico con las propuestas de mejoras incluidas

3.2 Análisis de las mejoras propuestas al accionamiento eléctrico

A continuación se explican con más detalle las mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), que son propuestas en esta tesis.

1. Prescindir del interruptor Siemens de 2000 A al vacío.
2. Reajustar el variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa a su tensión de salida de 370V a 480V.
3. Utilizar la tarjeta de comunicación del variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa.
4. Cambiar del transformador del accionamiento por un transformador especial diseñado específicamente para trabajos con variadores de velocidad (VFD) con filtros de armónicos incluidos.
5. Reubicar el Multilin SR-469.
6. Cambiar el interruptor de alimentación del cubículo del VFD.

1. Prescindir del interruptor Siemens de 2000 A al vacío.

En la actualidad se ha demostrado que las acciones preventivas sobre todos los equipos eléctricos, disminuyen las posibles causas de averías en la mayoría de los accionamientos. En este caso hablamos del interruptor general (52) (ver figura 2.1a). Este es un interruptor del modelo Siemens de 2000 A al vacío, 50/60 Hz, Modelo 3WS1570-OWA66-1JA6-Z, hecho en Alemania, con una tensión de operación permisible hasta 690 V, manejando por sus características constructivas altas corrientes, y a su vez presenta un esquema de control el cual no está exento a fallas.

La correcta selección del esquema a instalar en cualquier accionamiento eléctrico es de vital importancia para disminuir los gastos por concepto de posibles fallas, este caso en particular presenta dos interruptores en serie (ver monolinial del esquema actual Cap. II), el cual evidentemente se hace innecesaria su utilización.

La simplificación del esquema de accionamiento, en este caso dejando solo al interruptor de alimentación Modelo NZM 12-800-NA Klöner Moeller de 800 A, a una tensión permisible de 600 V, con protección térmica; disminuye las probabilidades de la ocurrencia de los indeseables cortocircuitos.

Con la eliminación de este interruptor se estaría disminuyendo las posibles fallas internas del mismo, los disparos indeseados, el tiempo de interrupción por concepto de mantenimiento, así como la disminución de los materiales para los mismos; además sería un equipo para su uso en otro accionamiento que lo necesite.

2. Reajustar el variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa a su tensión de salida de 370V a 480V.

Actualmente debido a la presencia de las sobretensiones generadas por los armónicos se tomó la decisión de limitar el valor máximo de voltaje de salida del mismo, para amortiguar estos efectos, lo cual provoca que no pueda operar a máxima capacidad; con esta propuesta se logra aumentar este valor, hasta su valor nominal de 480 VAC, logrando aumentar la eficiencia de todo el accionamiento.

Parámetro a cambiar en el VFD F7.

Parámetro	Actual	Ajustar
------------------	---------------	----------------

E1-04

370 V

480 V

Valor óptimo

3. Utilizar la tarjeta de comunicación del variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa.

Esta es una de las ventajas que posee el variador de velocidad F7, brinda un sinnúmero de posibilidades para el control y monitoreo del accionamiento eléctrico. Esta tarjeta (figura 3.2b) se utiliza para poner en marcha o parar el variador de velocidad, seleccionar o hacer referencia a parámetros y para monitorear la frecuencia de salida, la corriente de salida o elementos similares mediante comunicación vía Ethernet, la cual aumenta la rapidez de adquisición de datos.



Figura 3.2b Tarjeta opcional PCB, Ethernet (3G3RV-PDRT2).

Actualmente los más de 100 variadores de velocidad instalados en la Empresa carecen de sistemas de monitoreo, los cuales puedan servir como elemento de operación y control; debido a que los mismos solamente tienen habilitadas señales eléctricas, a través de salidas analógicas del propio VFD (dos salidas analógicas), las cuales no son suficientes. Con la implementación de esta tarjeta opcional, se resolvería aproximadamente más del 90 % de las señales que se desearían censar, en dependencia de las necesidades de cada accionamiento. En la figura 3.2c se muestra un ejemplo de las posibilidades que permite la utilización de esta tarjeta



Figura 3.2c Foto del programa Drive Wizard con los gráficos del (VFD).

4. Cambiar del transformador del accionamiento por un transformador especial diseñado específicamente para trabajos con variadores de velocidad (VFD) con filtros de armónicos incluidos.

En la actualidad se encuentra instalado un transformador convencional de (400 kVA), que no presenta filtros de armónicos, y *actúa por tanto como un amplificador de las distorsiones generadas por el variador de velocidad*. Existen transformadores especiales para variadores de velocidad, con filtrado de armónicos, que son fabricados específicamente con estos fines.

Comparación de las mediciones en los transformadores de la Planta de Sulfuros con respecto a la planta de lixiviación.

La utilización de los transformadores especiales, es una de las opciones que han brindado muy buenos resultados en la Empresa Pedro Sotro Alba, como es el caso de las dos bombas de licor de la planta de lixiviación, la cual opera en las mismas condiciones por alrededor de cuatro años, sin presentar ninguna falla por cortocircuito.

Es necesario aclarar que el principal objetivo de la planta de lixiviación es llevar a cabo la disolución de los óxidos de níquel y cobalto en forma de sulfatos a través de un reactivo químico conocido con el nombre de ácido sulfúrico, presenta un esquema similar al accionamiento eléctrico de bomba de licor instalado en la Planta de Sulfuros (objeto de estudio en la tesis).

Se realizaron mediciones para establecer comparación de los beneficios que pueden generar los transformadores especiales de fuerza para variadores de velocidad con respecto a los que utilizan transformadores convencionales. En las gráficas del Anexo 3.2a, se muestran los efectos que provoca el transformador especial (filtros de armónicos) para variador de velocidad. Demostrándose a través de las mediciones realizadas, que no superan los 4,16 kV, para un rango de frecuencia que oscila entre un 70 % hasta un 95 % aproximado de la velocidad del motor.

Es importante resaltar que este accionamiento instalado en la planta de Lixiviación, ha trabajado en este régimen desde su puesta en marcha por alrededor de cuatro años, sin haber ocurrido ninguna falla de cortocircuitos en el conductor de media tensión (5 kV), lo que demuestra que la utilización de estos transformadores especiales para variadores de velocidad con filtros de armónicos, son factibles para estos tipos de accionamientos.

5. Reubicar el Multilin SR-469.

El Multilin SR-469, está fabricado especialmente para la protección eléctrica de motores, en este caso la posición actual de instalación del mismo, no brinda de forma segura una protección eficiente, debido a que está ajustado a valores referidos por tener un transformador que se antepone al motor.

Con la nueva propuesta de implementación, se lograría que el mismo tomara los valores reales del motor, haciendo más eficiente las protecciones eléctricas del accionamiento en cuanto a selectividad, sensibilidad y velocidad de respuesta, accionando directamente sobre

el variador de velocidad a través de una entrada digital. Además que se tendría que alambrear hacia el Multilin SR-469 los transformadores de corrientes y potencial (TP / TC), instalados actualmente para la medición de variables eléctricas a la PQM, para las nuevas condiciones de trabajo, en este caso a 4160 V, para una corriente nominal de 32.5 A, sustituyendo los actuales instalados en la pizarra de 480 V.

Se mejora la comunicación por el Multilin SR-469 Citect SCADA.

Actualmente las mediciones eléctricas en el motor, solo están reducidas a la corriente de la fase C, dejando una serie de variables imprescindibles para la toma de decisiones y operaciones; reubicando el Multilin SR-469, se lograría tomar como vía de comunicación (profibus RS-485) con el sistema SCADA (Citect), una serie de parámetros eléctricos los cuales serían muy importantes tales como (Potencia (P, Q y S), tensiones de líneas y fases, factor de potencia, energía, corrientes, demanda, señales de temperatura (RTD), entre otras.)

Reprogramación del Multilin SR-469

Como resultado del cambio de posición del Multilin se hace necesario reprogramarlo a las nuevas condiciones ventajosas.

Tabla 3.2a Parámetros y ajustes de los parámetros en la programación del Multilin

Nº	Parámetros	Según norma ANSI	Ajuste
1	Ajuste de corriente		75/5 A
2	Ajuste de voltaje		34.66:1 (4160/120V)
3	Protección térmica	51	1.25*FLA Curva. Estándar (Ver catalogo del SR-469).
4	Protección de sobrecarga	51	Curva. #. 4 (Ver catalogo SR-469).
5	Disparo por cortocircuito	50	5.3*TC, t=0 s

6	Desbalance por corriente	46	Al 25 %, t=3 s
7	Falla de tierra	50G	0.66*TC, t=0 s
8	Protección por RTD #.1, estator	49	130 °C como alarma 150 °C como disparo
9	Protección por RTD #.2, estator	49	130 °C como alarma 150 °C como disparo
10	Protección por RTD #.3, estator	49	130 °C como alarma 150 °C como disparo
11	Protección por RTD #.7, cojinete	38	95 °C como alarma
12	Protección por RTD #.8, cojinete	38	95 °C como alarma
13	Bajo voltaje	27	0.85*Un como alarma
14	Protección por baja frecuencia	81	57.5 Hz, t=0 s
15	Protección por alta frecuencia	81	70.0 Hz, t=0 s

Existen dos métodos para programar el Multilin SR-469:

1. De forma manual, a través del teclado frontal del Multilin SR-469.
2. A través de la comunicación vía RS-2323 o vía RS-485, a través de una PC.

En este caso la reprogramación del Multilin SR-469, fue realizada a través de una laptop, la cual tiene instalado el programa EnerVista (figura 3.2a), el cual permite realizar el ajuste de los relés Multilines).

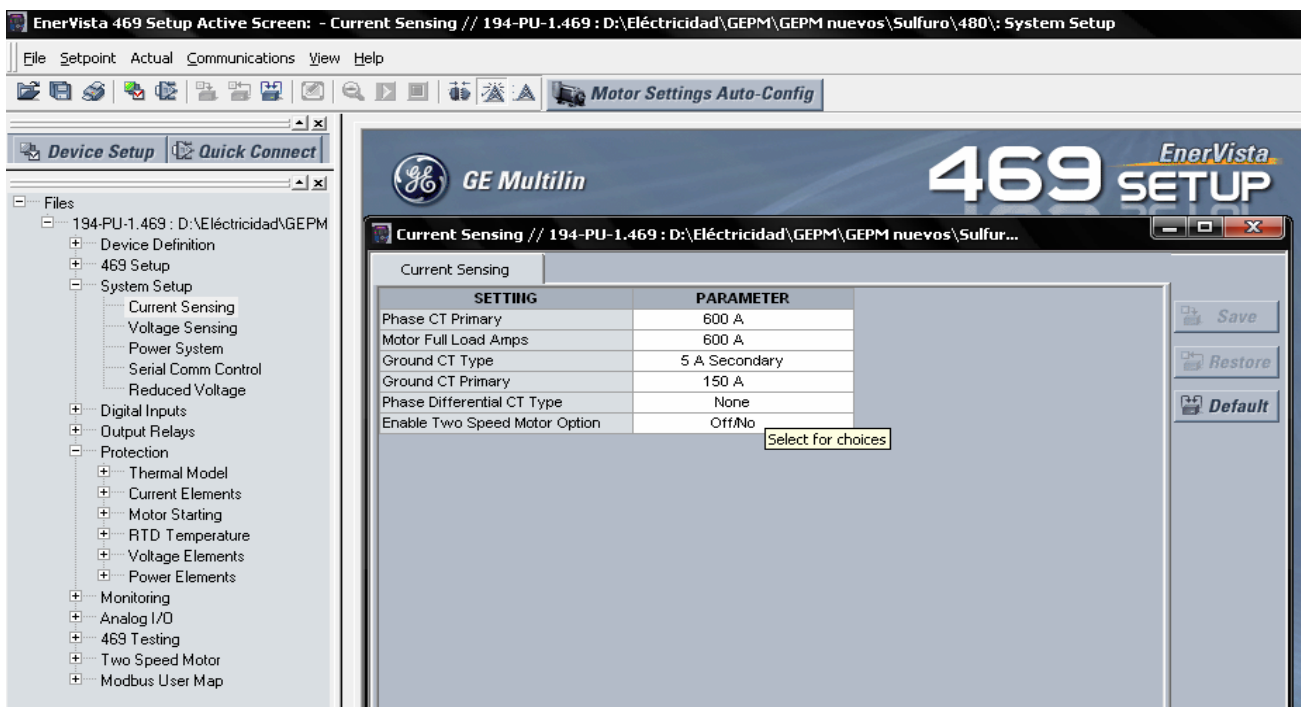


Figura 3.2a Reprogramación del Multilin mediante el software EnerVista

6. Cambiar el interruptor de alimentación del cubículo del VFD.

Se propone el cambio del interruptor de alimentación en cubículo del VFD, modelo NZM 12-800-NA Kloner Moeller de 800 A, a una tensión permisible de 600V AC con protección térmica por otro interruptor más moderno de modelo NZM4 Moeller de 800A, a una tensión permisible de 690V AC, con protección térmica y el accesorio de una bobina de disparo.

Esta bobina de disparo va conectada a un contacto auxiliar denominado (R1) del propio Multilin SR-469 que existen para los disparos por protecciones eléctricas, mejorando considerablemente el accionamiento eléctrico ya que el variador de velocidad (VFD) necesita ser desconectado inmediatamente ante un cortocircuito para su mejor protección, debido a que éste no presenta capacidad de interrupción suficiente para cortocircuitos de altas magnitudes. En la tabla 3.2a se muestran algunos datos y el ajuste de los parámetros del interruptor.

Tabla 3.2a Datos y ajuste del interruptor seleccionado

Modelo	Moeller NZM 4
In (Corriente nominal)	800A
Un (tensión nominal)	690 V
Iaj (Corriente de ajuste nominal)	0.8*800 = 640 A
Itrip (Corriente de disparo)	<u>6*I ajuste = 3840 A</u>
Nota. Este interruptor tiene como accesorio una bobina de disparo que permite su apertura a través de una señal eléctrica (110V AC) por el Multilin SR-469.	

3.3 Valoración Económica del conjunto de mejoras propuestas al accionamiento de la bomba de licor

Por la exigencia del proceso tecnológico, frecuentemente se hace necesario variar el caudal Q, lo que en la mayoría de los casos, se realiza estrangulando el flujo a través de válvulas mecánicas y con esto aumenta la resistencia de la red y disminuye el rendimiento de la instalación. Actualmente los sistemas a través de variadores de velocidad están dejando atrás a los sistemas que trabajan con estrangulación mecánica, teniendo en cuenta que los métodos a través de VFD, poseen una regulación más suave, con un consumo de energía mínima.

En esencia, la introducción de estas mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) con los variadores de velocidad, está avalada mediante un estudio económico del proceso para mejorar la eficiencia del accionamiento. Las mejoras permitirán la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba.

Los resultados de los principales indicadores tomados en cuenta en la determinación de los gastos de explotación de la instalación actual, trabajando en condiciones de régimen normal de trabajo, se muestran a continuación.

- **Costo de la instalación actual**

El costo de la instalación actual se muestra en la tabla 3.3a.

Tabla 3.3a Costos de los dispositivos del accionamiento eléctrico actual en CUC.				
Dispositivos	Cantidad	Unidad de medidas	Precio por unidad	Precios (CUC)
Un interruptor del tipo 3WS1, al vacío, de la firma Siemens de 2000 A, 480 V.	1	N/P	17 354.12	17 354.12
Multilin SR-469, par protección de motores.	1	N/P	10 210.17	10 210.17
Un variador de velocidad de 500 HP, 510 kVA, 675 A y 60 Hz, de la firma Yaskawa, modelo F7.	1	N/P	64 200.77	64 200.77
Transformador de fuerza convencional 400 kVA.	1	N/P	28 363.95	28 363.95
Motor eléctrico 200 kW.	1	N/P	57 151.56	57 151.56
Bombas centrífuga (194-PU-2).	1	N/P	130 341.73	130 341.73
Transformador de potencial (TP) del Multilin SR-469, para mediciones de 480 V.	2	N/P	393.17	786.34
Transformador de corriente (TC) del Multilin SR-469, para mediciones de 480 V.	3	N/P	139.5	418.5
Transformador de potencial (TP) de la PQM, para mediciones de 4 160 V.	2	N/P	882.96	1765.92
Transformador de corriente (TC) del PQM, para mediciones de 4 160 V.	3	N/P	640.5	1921.5
Conductor de baja tensión (1000 V) son los utilizados en 480V.	12	m	69.2	830.4
Conductor de baja media tensión (5000 V) son los utilizados en 4.16 kV.	80	m	47.36	3788.8
El costo total de la instalación actual en CUC es de 317 133 .76				

- **Costo de los componentes que se afectan por las mejoras propuestas**

Tabla 3.3b Costos de los dispositivos del accionamiento eléctrico que se ahorran				
Dispositivos	Cantidad	Unidad de medidas	Precio por unidad	Precios (CUC)
Un interruptor del tipo 3WS1, al vacío, de la firma Siemens de 2000 A, 480 V.	1	N/P	17 354.12	17 354.12
Transformador de fuerza convencional 400 kVA.	1	N/P	28 363.95	28 363.95
Transformador de potencial (TP) del Multilin SR-469, para mediciones de 4 160 V.	2	N/P	882.96	1765.92
Transformador de corriente (TC) del Multilin SR-469, para mediciones de 4 160 V.	3	N/P	640.5	1921.5
Interruptor KLONER MOELLER 600V AC	1	N/P	3741.6	3741.6
El costo total de los componentes que se afectan en CUC es de 53 147.07.				

Nota: El Transformador de fuerza convencional 400 kVA fue el dispositivo eléctrico que se tomo para el análisis económico que tiene una depreciación de un 20% y un valor actual en CUC es de 22 691.16.

- **Costo de los componentes que se incorporan con las mejoras**

El costo de los componentes que se incorporan con las mejoras, se muestra en la tabla 3.3b y la valoración económica a partir del cálculo de los parámetros tales como: VAN, TIR y MPR.

Tabla 3.3c Costos de los dispositivos que se incorporan al accionamiento eléctrico				
Dispositivos	Cantidad	U/m	Precio por unidad	Precios (CUC) (Redondeado)
Transformador especial para (VFD) 500 kVA, con filtros de armónicos.	1	N/P	50235.00	50240.00
Tarjeta opcional para comunicación del VFD.	1	N/P	395.90	400
Bobina de disparo	1	N/P	300	300
Mano de obra	4 Personas	64h	500	2000
Interruptor MOELLER 690V AC	1	N/P	3841.6	3850
El costo total de la inversión a realizar en CUC es de 56 790.00.				

Métodos para Evaluar los Proyectos de Inversión

Los métodos usados para decidir si un proyecto debe ser o no aceptado pueden ser varios. A continuación detallaremos tres de los más novedosos y de amplio uso en la actualidad.

1. Método del período de recuperación: es aquel número de años que se requerirá para recuperar el monto total de la inversión original.
2. Método del valor presente neto (VAN): Es el valor presente de los flujos de efectivo futuro descontados al costo de capital, menos el monto de la inversión. Es una técnica del flujo de efectivo descontado.
3. Método de la tasa interna de rendimiento (TIR): Es la tasa de interés que iguala al valor presente de los flujos futuros de efectivo esperados con el costo inicial del proyecto. También es una técnica del flujo de efectivo descontado.

Para el cálculo de los parámetros se consideraron las pérdidas económicas que tuvieron lugar en el año 2009 cuando se produce una falla de cortocircuito monofásico en el conductor de media tensión (4.16kV) que conlleva el cambio del mismo y una afectación a la producción en el autoclave # 2 de la Planta de Sulfuros por seis horas que representa una pérdida de seis toneladas de sulfuro de Ni+ Co.

Como se representa en la tabla 3.3d, con un valor promedio en el año en curso del Ni en el mercado internacional de una tonelada (1t) = 10 846.73 CUC, se puede observar que fue uno de los años donde el precio del níquel más bajos (plena crisis económica mundial).

Tabla 3.3d Pérdidas económicas relacionadas con el cortocircuito monofásico ocurrido en el año 2009.

Pérdidas por la Falla CC1Ø	Unidades de mediadas	CUC
Perdida de producción.	6t	86 773.84
Compra del conductor de (5kV)	80 m	3 788.8
Total	-----	90 566.64

En la remodelación del sistema eléctrico de la bomba de licor de la Planta de Precipitación de Sulfuros a partir del año 2002, vienen sucediendo una serie de fallas de cortocircuito monofásico en el conductor de media tensión (4.16kV) de alimentación al motor (alrededor de seis o más fallas). Estas han proporcionado un incremento del gasto económico por concepto de la compra del mismo, alrededor de 80 m, lo que significa 3 788.8 CUC, más los gastos por producción, mano de obra, entre otras, lo que calculando se obtiene $3788.8 \times 7 = 26521,6$ CUC, solo por concepto de cables. Como dato a resaltar en el año 2009 donde de se hace la valoración económica ocurrieron dos fallas más de los accionamientos eléctricos del mismo tipo (194-PU-2 y una 194-PU-1), quiere decir que en total fueron tres fallas de cortocircuito monofásico en la misma Planta de Sulfuros.

Criterio del Valor Presente Neto (VPN o VAN).

Si el Valor Presente Neto es positivo, se acepta el proyecto, si es negativo se rechaza. Entre proyectos excluyentes se elige el que mayor valor presente neto alcance.

Su ecuación fundamental es:

$$\text{Valor Presente Neto} = [CF_1/(1+k) + CF_2/(1+k)^2 + \dots + CF_n/(1+k)^n] - I$$

$$VAN = \sum_{t=1}^n CF_t / (1+k)^t - I$$

VAN 15 % = \$CUC 292 000.

n = 20 años (Para una vida útil de 20 años).

Cf_1, Cf_2, Cfn : flujos netos de efectivos.

n: vida esperada del proyecto

K: Tasa de descuento apropiada, costo de capital del proyecto.

Método de la Tasa Interna de Rendimiento (TIR):

La tasa interna de rendimiento es la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos futuros efectivos esperados, con el costo inicial del proyecto.

La ecuación para calcular la tasa interna de rendimiento es la siguiente:

$$TIR = [CF_1/(1+R) + CF_2/(1+R)^2 + \dots + CF_n/(1+R)^n] - I = 0$$

$$TIR = \sum_{t=1}^n CF_t / (1+R)^t - I = 0$$

TIR = 72.3%

En esta ecuación “I” significa los gastos del proyecto de inversiones y “Cf_n”, los flujos de efectivo, pero la incógnita a encontrar es “R” que debe tener un valor tal que la suma de los flujos descontados a ese valor sea igual al costo inicial del proyecto con lo que se iguala la ecuación a cero y que ese valor de “R” se conoce como la tasa interna de rendimiento.

Método del Período de Recuperación (MPR)

El período de recuperación se define como el número de años que requiere la Empresa para recuperar su inversión original a partir de los flujos netos de efectivo.

MPR = 1.5 años.

El VAN, TIR y MPR se realizó con el programa de Excel como se muestra en la figura 3.3a.

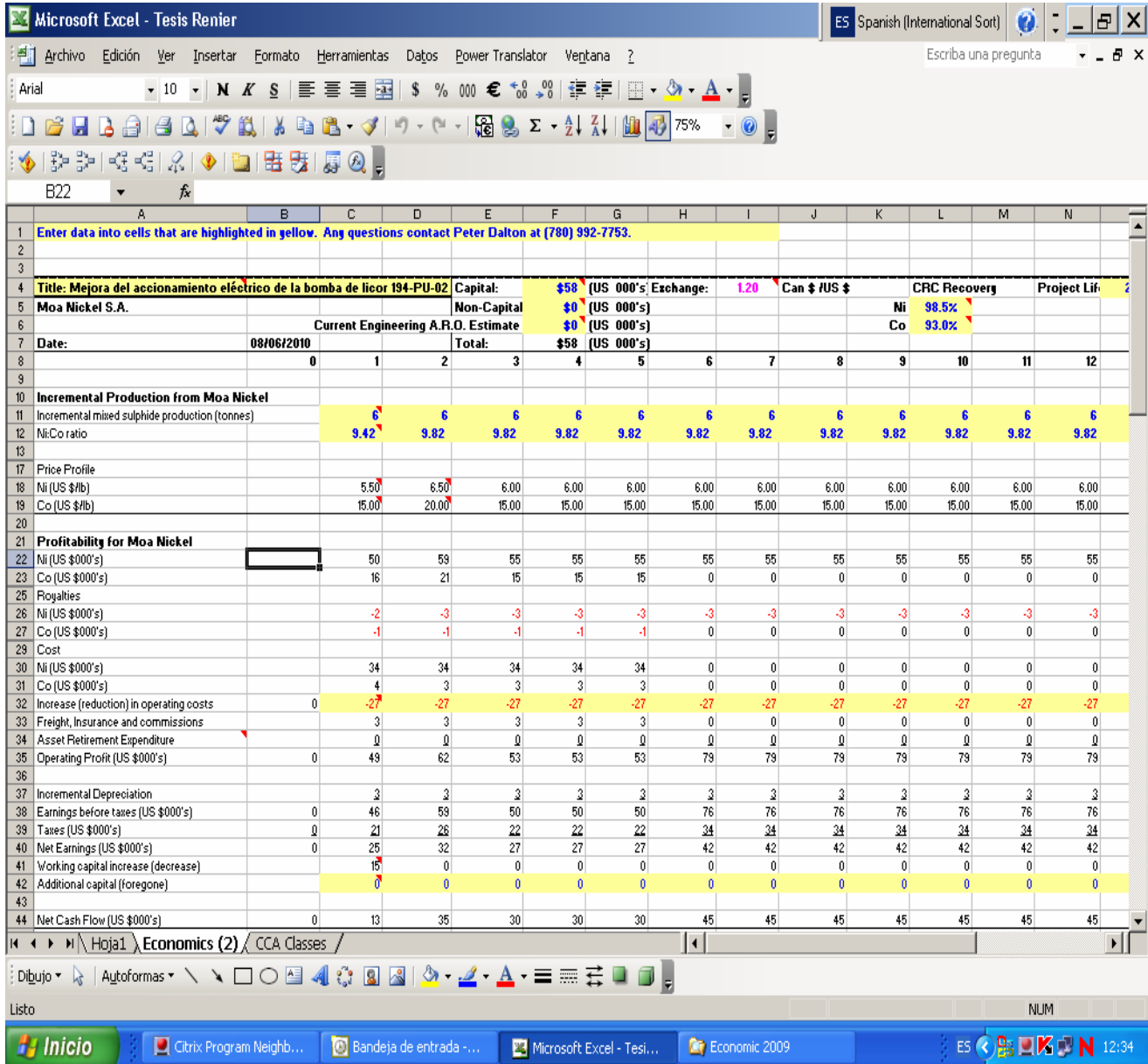


Figura 3.3a Hoja de cálculo en Microsoft Excel para la obtención de parámetros económicos.

Las propuestas de mejoras del accionamiento de la bomba de licor (194-PU-2), además de tener un importante impacto económico, pueden utilizarse en el aprendizaje de los futuros ingenieros como material de consulta, así como ampliar sus conocimientos en el mundo de los accionamientos y las protecciones (variadores de velocidad (VFD) y Multilin SR-469).

Conclusiones del capítulo 3:

- El accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) puede ser mejorado para superar las causas que originan las perjudiciales interrupciones, si se toman las siguientes medidas: 1) prescindir del interruptor Siemens de 2000 A al vacío, 2) reajustar el variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa a su tensión de salida de 370V a 480V, 3) utilizar la tarjeta de comunicación del variador de velocidad (VFD) F7 Yaskawa, 4) cambiar del transformador del accionamiento por un transformador especial diseñado específicamente para trabajos con variadores de velocidad (VFD) con filtros de armónicos incluidos, 5) reubicar el Multilin SR-469, y 6) cambiar el interruptor de alimentación del cubículo del VFD.
- Con la incorporación de las mejoras propuestas al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2), se puede evitar un gran número de averías y ampliar su vida útil; logrando un efecto económico anual de unos 90 566.64 CUC, por concepto de mineral dejado de procesar al estar fuera de servicio este sistema y la compra del conductor averiado.

CONCLUSIONES GENERALES:

- La Planta de Sulfuros es la encargada de la obtención de los sulfuros de níquel y cobalto, producto final de la compañía Moa Nickel S.A. "Pedro Sotto Alba". El accionamiento eléctrico de esta Planta está conformado en su parte de fuerza por un interruptor Siemens de alimentación (52), que alimenta al cubículo del variador de velocidad, modelo F7 Yaskawa de 500 HP, con un tensión de 480 V. Este a su vez suministra energía a un transformador elevador de 400 kVA, de 480V a 4160V con cinco derivaciones por el lado secundario, el cual es el encargado de alimentar al motor de 200 kW (268 HP), y a su vez mueve una bomba centrífuga acoplada en su eje, encargada de bombear el flujo de licor desde el tanque de precalentamiento hacia la autoclave #.2. Asociado a esto se encuentran otros elementos tales como: Multilin SR-469 destinado a la protecciones eléctricas, transformadores de potencial y transformadores de corrientes destinados para señales de medición, interruptores de control y elementos asociados al variador; los cuales operan en el funcionamiento del sistema.
- A raíz de las fallas ocurridas en el accionamiento eléctrico y teniendo en cuenta las pérdidas aportadas a la Empresa se tomaron varias acciones sobre el accionamiento que tendieron a mejorar algunas funcionabilidades del mismo, aportaron en la funcionabilidad del accionamiento eléctrico, amortiguando (no en gran medida) los picos de sobre tensión generados, lo que no fue una solución definitiva, debido a que en la actualidad se siguen generando sobretensiones por encima de los 5000 V, lo que sigue siendo perjudicial para el accionamiento.
- En el accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) de la Planta de Sulfuros en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba se están generando armónicos de tensiones perjudiciales provocados por el variador de velocidad (VFD), que alimenta al transformador convencional de (480/4160V), elevando las sobretensiones que conllevan a las pérdidas del aislamiento del conductor de media tensión (5kV) en el transcurso del tiempo, produciendo los cortocircuitos monofásicos.

- El esquema mejorado está conformado por un cubículo que se encuentran varios elementos de fuerza, donde se incluyen, interruptor general del cubículo que alimenta al variador de velocidad (VFD) F7, modelo Yaskawa, a través del reactor de línea. En los terminales de salida del VFD se conecta el transformador especial diseñado para trabajos con variadores de velocidad, el cual aumenta la tensión desde los 480 V hasta los 4160 V, que alimenta al motor eléctrico de 200 kW, de donde tomaría las señales de corriente y potenciales (TC / TP) el Multilin SR-469 diseñado específicamente para la protección eléctrica de motores, además de censar las variables de temperatura a través de las RTD, tomando la muestra desde el estator y de los cojinetes.
- La introducción de estas mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba de licor (194-PU-2) con los variadores de velocidad está avalado por el presente estudio económico del proceso para mejorar eficiencia en el accionamiento, permite la disminución de las pérdidas de energía y aumenta el tiempo de vida útil o empleo de la bomba. Con la introducción de estas mejoras al accionamiento eléctrico de la bomba (194-PU-2) desarrollada se puede evitar gran número de averías y ampliar la vida útil de los accionamientos eléctricos de la bomba centrífuga de licor 194-PU-2 donde se logra un efecto económico anual de unos **90 566.64** CUC pesos convertibles, por concepto de mineral dejado de procesar por fuera de servicio de este sistema y compra del conductor en el año 2009.

RECOMENDACIONES

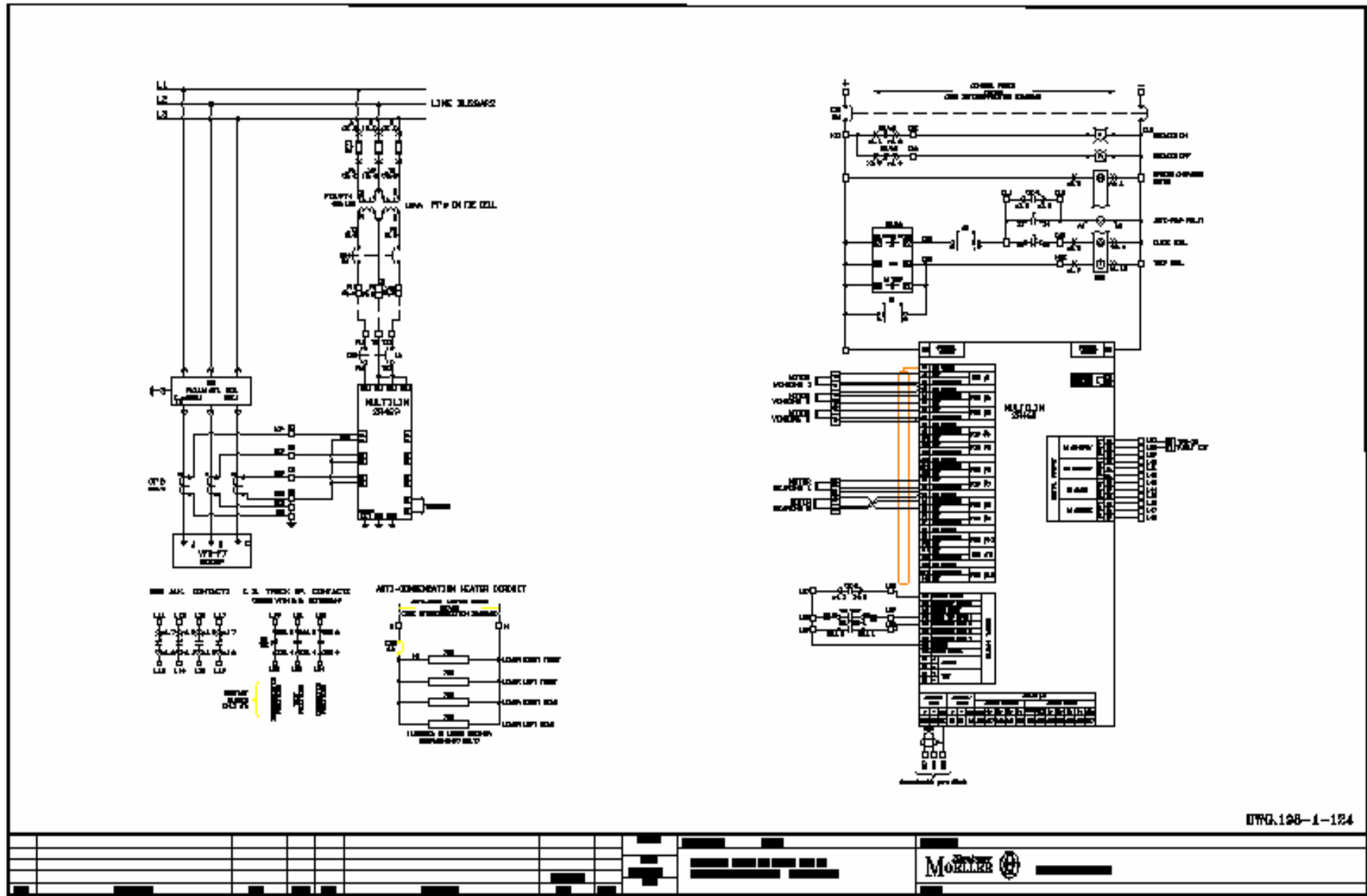
1. Para el cambio del transformador especial para variadores de velocidad (VFD) se debe hacer el paro de mantenimiento general en un fin de campaña.
2. El transformador que se propone está sobredimensionado más que el que se sustituyó pero fueron por razones económicas y de producción (este está en el almacén). Se recomienda considerar otro transformador especial para variadores de velocidad (VFD) de menor potencia aparente para disminuir más los costos de la inversión a gran escala para los otros accionamientos que presenta iguales tipo de falla después estudio más profundo.
3. Se puede valorar la posibilidad de otro equipo de protección diferente al Multilin SR-469 que cumpla los requisitos apropiados para el mismo esto servirá para disminuir más los costos de la inversión en gran escala.

Bibliografía.

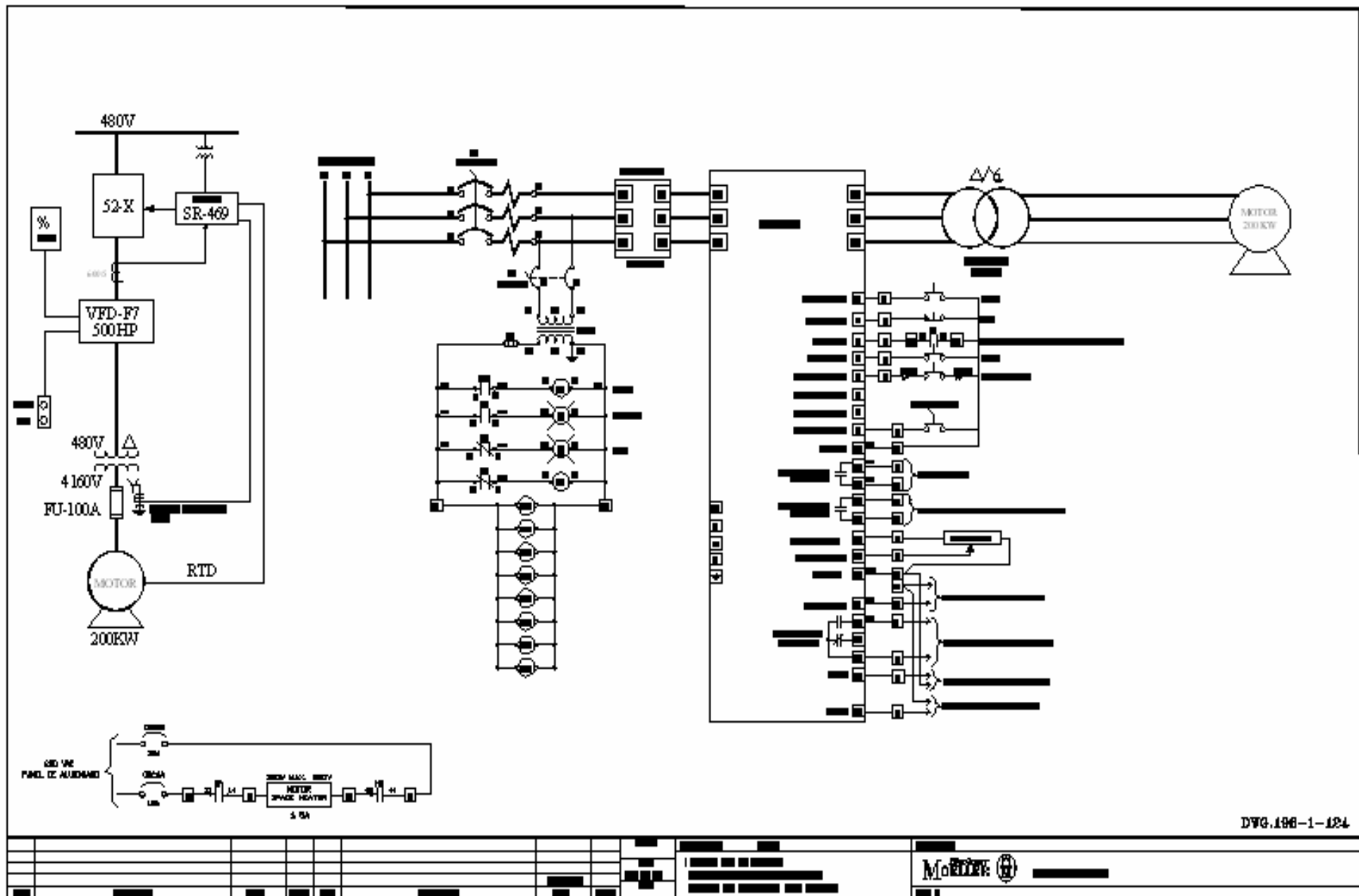
- www.GEMultilin.com
- Instruction Manual (469 Motor Management Relay).
- Instruction Manual (SIEMENS 3WS Leistungsschalter AC Circuit Breaker).
- Instruction Manual (YASKAWA F7 Drive).
- www.drives.com
- Instruction Manual (PQM Power Quality Meter)
- Máquinas Eléctricas Tomo I y II (M Kostenko y L Piotrovsky).

ANEXOS

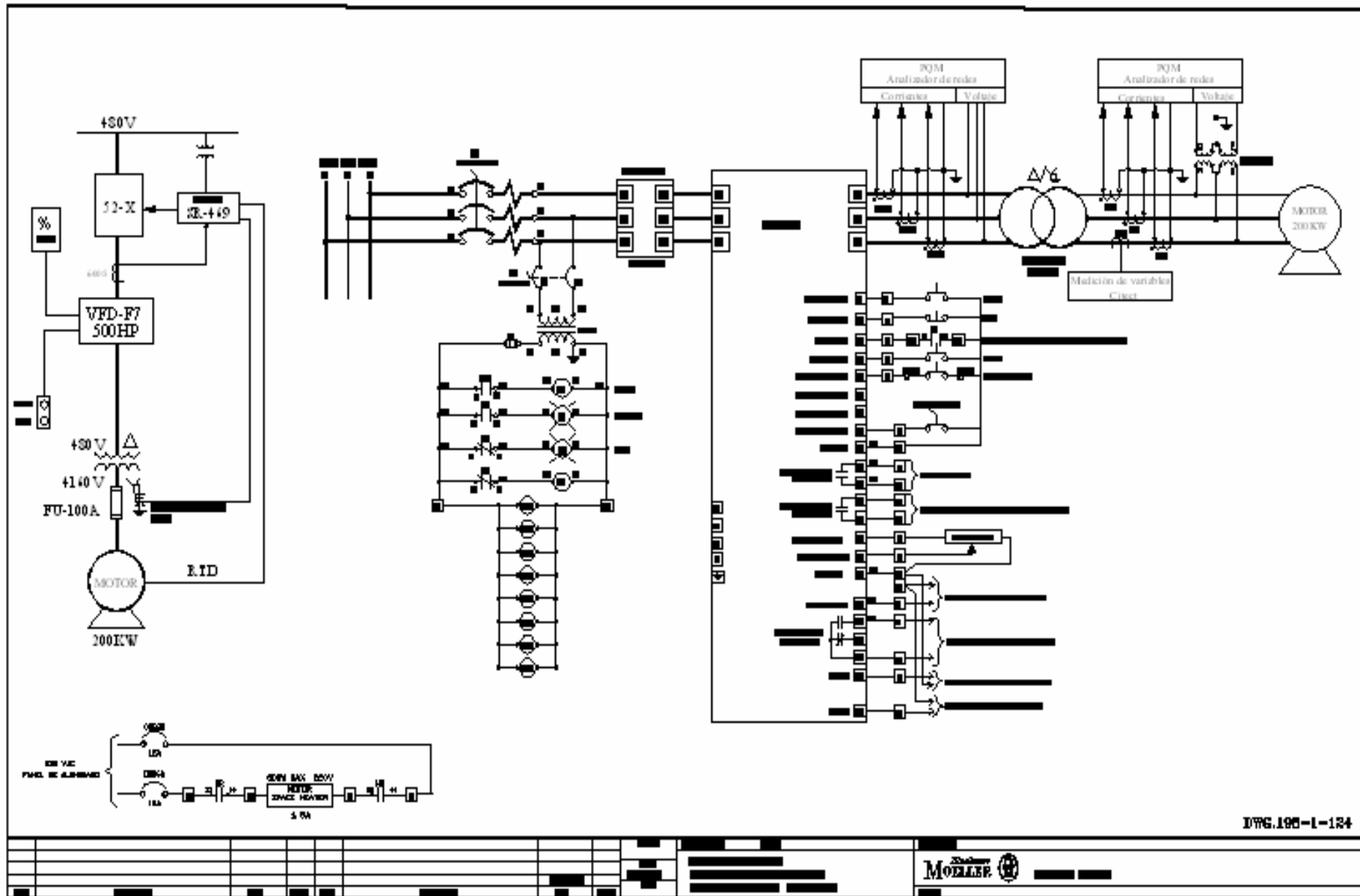
Anexo 2.1a Esquema actual del Multilin SR-469.



Anexo 2.1b Esquema actual del variador de velocidad F7.



Anexo 2.3a Esquema del accionamiento correspondiente al experimento

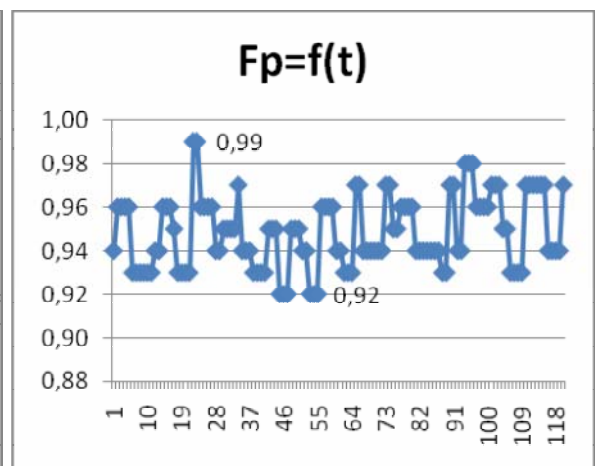
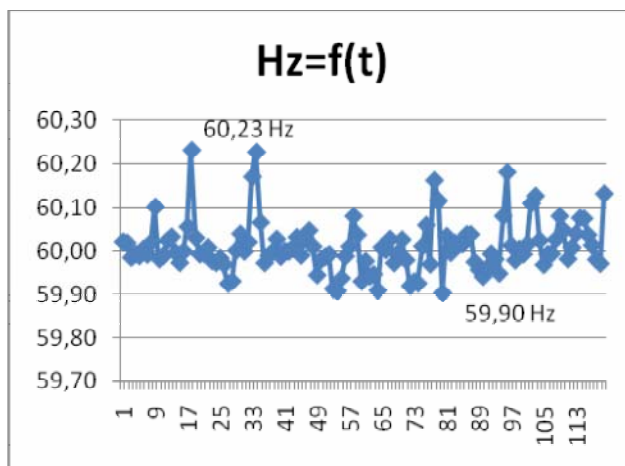
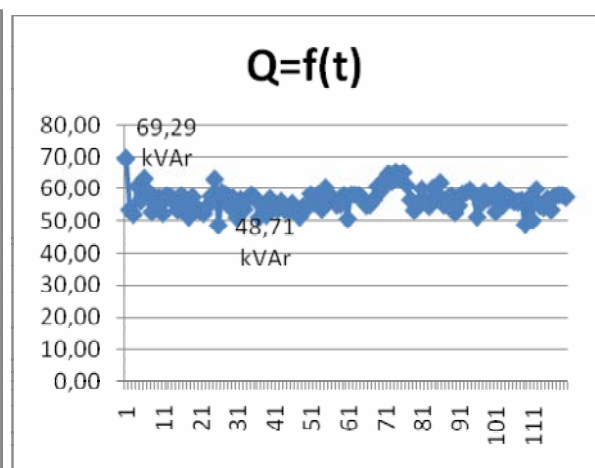
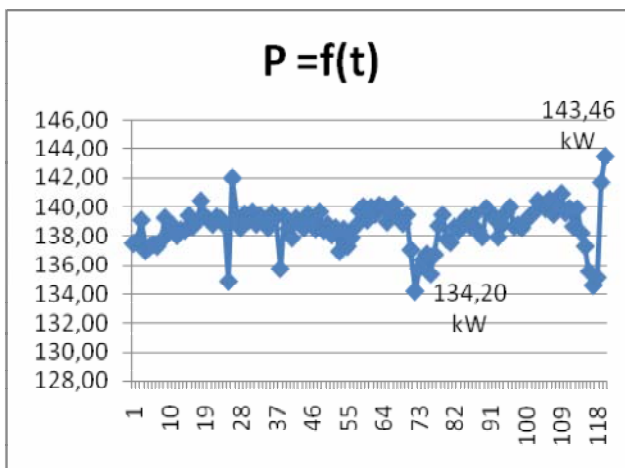
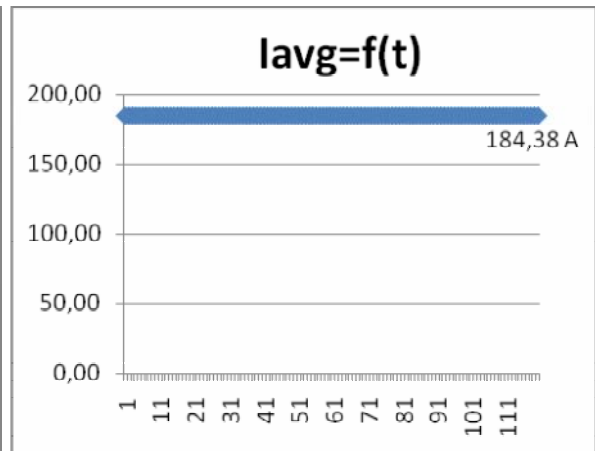
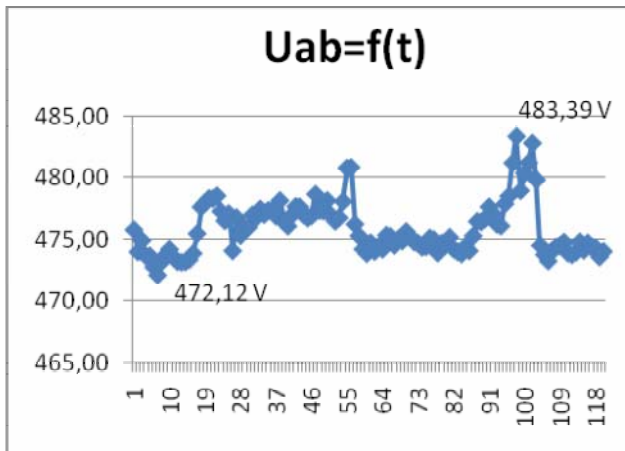


Anexo 2.3b Mediciones registradas por el Multilin SR-469.

Fecha	Tiempo	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)	Iabc(A)	Ua(v)	Ub(v)	Uc(v)	Fp
28/10/2009	17:07:57	175,00	175,00	171,88	184,38	274,45	274,98	274,49	0,97
28/10/2009	17:10:06	175,00	175,00	171,88	184,38	273,95	274,60	274,01	0,97
28/10/2009	17:12:15	175,00	175,00	171,88	184,38	273,87	274,50	274,00	0,97
28/10/2009	17:14:24	175,00	175,00	171,88	184,38	273,98	274,48	274,15	0,97
28/10/2009	17:16:33	178,13	178,13	175,00	184,38	274,46	275,07	274,61	0,97
28/10/2009	17:18:43	178,13	178,13	175,00	184,38	274,08	274,71	274,08	0,97
28/10/2009	17:20:52	178,13	190,63	193,75	184,38	274,42	274,95	274,53	0,94
28/10/2009	17:23:01	178,13	190,63	193,75	184,38	274,22	274,75	274,29	0,94
28/10/2009	17:25:10	178,13	190,63	193,75	184,38	274,19	274,70	274,34	0,94
28/10/2009	17:27:19	178,13	190,63	193,75	184,38	273,76	274,32	273,96	0,94
28/10/2009	17:29:28	178,13	178,13	175,00	184,38	274,02	274,68	274,21	0,97

Fecha	Tiempo	U línea AB (V)	U línea BC(V)	U línea CA(V)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)	Hz
28/10/2009	17:05:48	474,54	475,63	474,62	140,89	48,91	149,14	60,08
28/10/2009	17:07:57	474,79	475,72	474,87	139,58	56,87	150,72	60,05
28/10/2009	17:10:06	473,93	475,06	474,03	139,90	50,20	148,64	59,98
28/10/2009	17:12:15	473,80	474,88	474,03	138,66	59,85	151,03	60,01
28/10/2009	17:14:24	473,98	474,85	474,28	139,87	54,82	150,23	60,04
28/10/2009	17:16:33	474,82	475,87	475,07	138,23	54,32	148,52	60,08
28/10/2009	17:18:43	474,15	475,25	474,16	137,30	56,65	148,53	60,07
28/10/2009	17:20:52	474,74	475,66	474,94	135,56	53,51	145,74	60,04
28/10/2009	17:23:01	474,40	475,31	474,52	134,59	57,62	146,41	60,01
28/10/2009	17:25:10	474,35	475,24	474,60	135,14	58,07	147,09	59,98
28/10/2009	17:27:19	473,61	474,57	473,95	141,67	58,11	153,12	59,97
28/10/2009	17:29:28	474,06	475,19	474,39	143,46	57,37	154,50	60,13

Anexo 2.3c Gráficos obtenidos de las mediciones del Multilin SR-469.

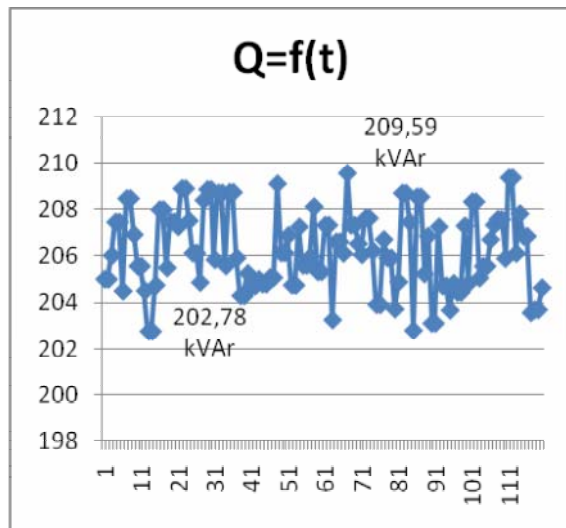
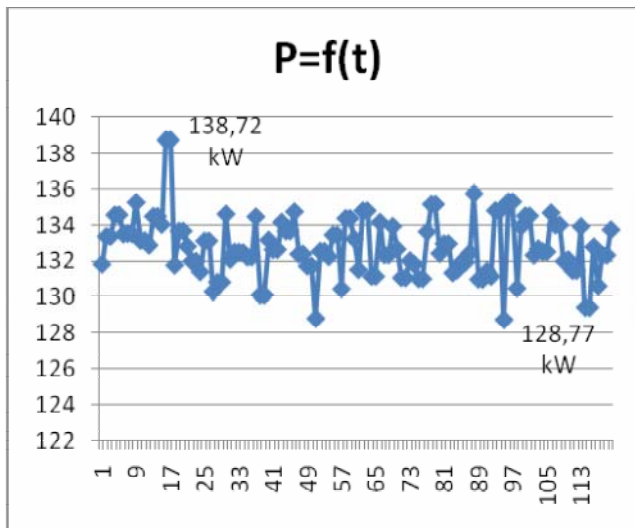
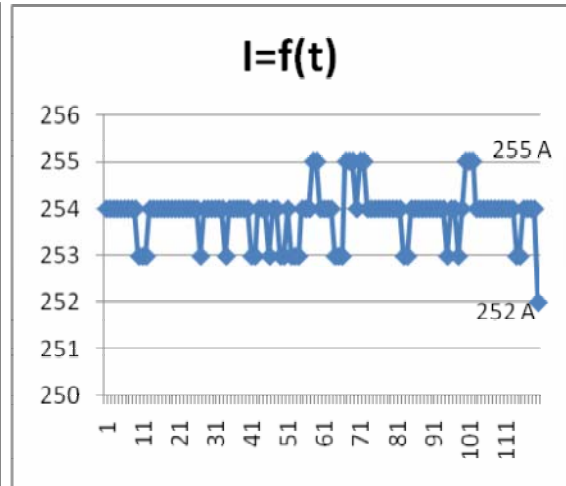
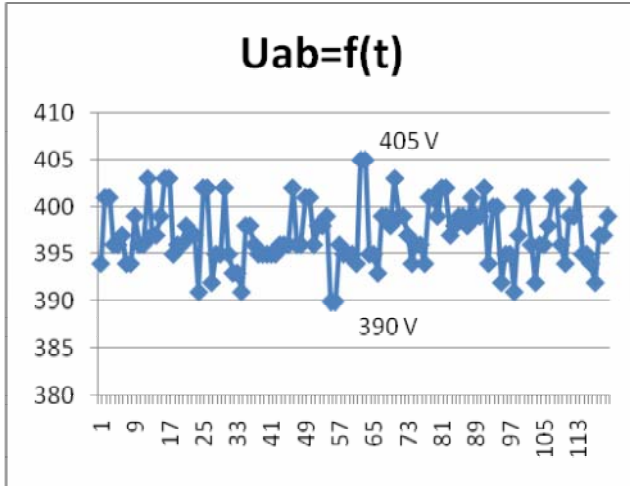


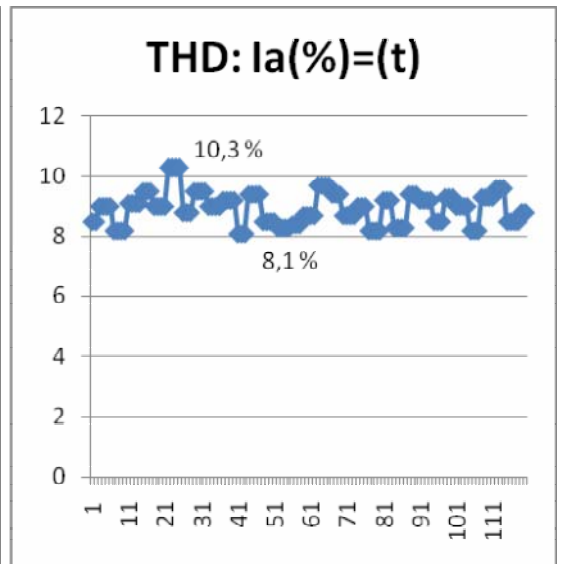
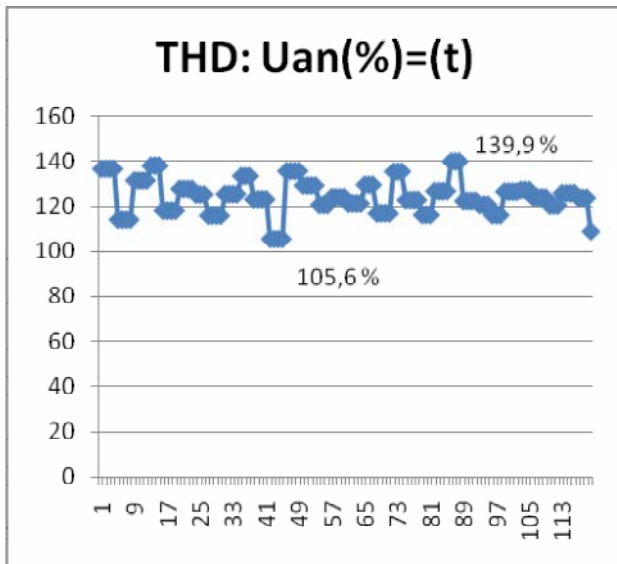
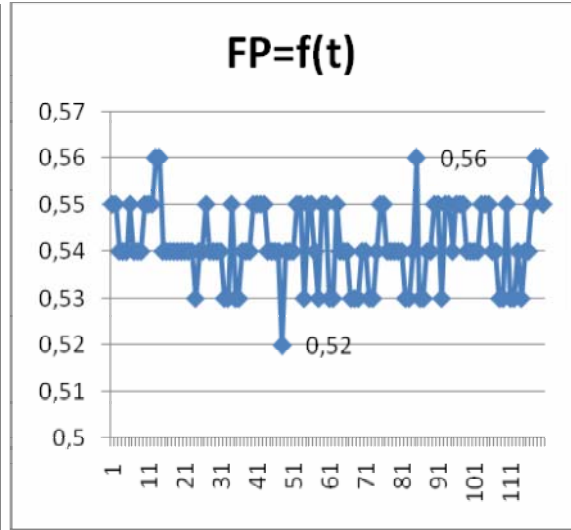
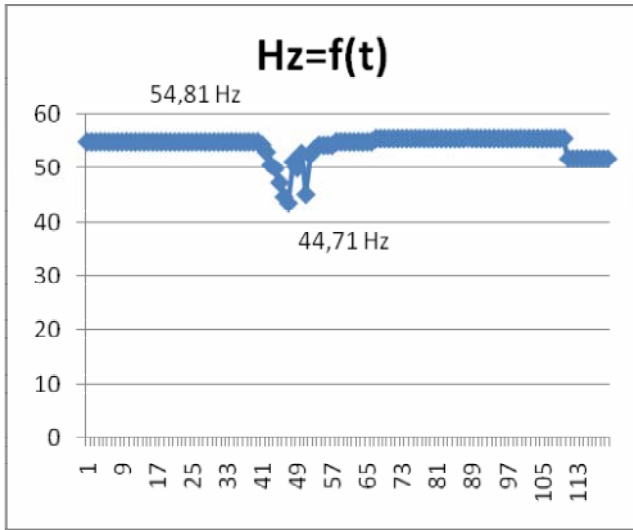
Anexo 2.3d Medición en la salida del variador de velocidad.

Mediciones a la salida del VFD									
Rango	Tiempo	Corriente: Ia	Corriente: Ib	Corriente: Ic	Corriente: Iavg	Tensión: Uab	Tensión: Ubc	Tensión: Uca	Frecuencia
#	(s)	(A)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(Hz)
1	0	253	247	262	254	399	390	391	51,78
2	1	253	247	262	254	399	390	391	51,79
3	2	252	248	261	254	402	396	403	51,81
4	3	252	246	261	253	395	392	401	51,81
5	4	252	246	261	253	395	392	401	51,8
6	5	253	247	261	254	394	397	400	51,79
7	6	253	248	262	254	392	395	393	51,78
8	7	253	246	262	254	397	393	400	51,8
9	8	253	246	262	254	397	393	400	51,79
10	9	251	246	260	252	399	399	403	51,78

Mediciones a la salida del VFD										
Rango	Tiempo	P3	Q3	FP	THD: Ia	THD: Ib	THD: Ic	THD: Uan	THD: Ubn	THD: Ucn
#	(s)	(kW)	(kVAr)	(cosΦ)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	0	131,48	209,39	0,53	9,3	6,9	9,2	120,5	128,2	139,7
2	1	131,48	209,39	0,53	9,6	7,4	9,2	120,5	128,2	139,7
3	2	133,91	206,14	0,54	9,6	7,4	8,5	125,8	128,2	139,7
4	3	129,45	207,84	0,53	9,6	7,4	8,5	125,8	129,1	106,6
5	4	129,45	206,87	0,54	8,5	7,4	8,5	125,8	129,1	106,6
6	5	132,78	206,87	0,54	8,5	8,4	10,8	125,8	129,1	106,6
7	6	130,62	203,59	0,55	8,5	8,4	10,8	123,7	120	106,6
8	7	132,33	203,72	0,56	8,5	8,4	10,8	123,7	120	110,2
9	8	132,33	203,72	0,56	8,8	8,2	10,8	123,7	120	110,2
10	9	133,73	204,66	0,55	8,8	8,2	9,6	109	120	110,2

Anexo 2.3e Gráficos obtenidos de las mediciones en la salida del variador de velocidad.



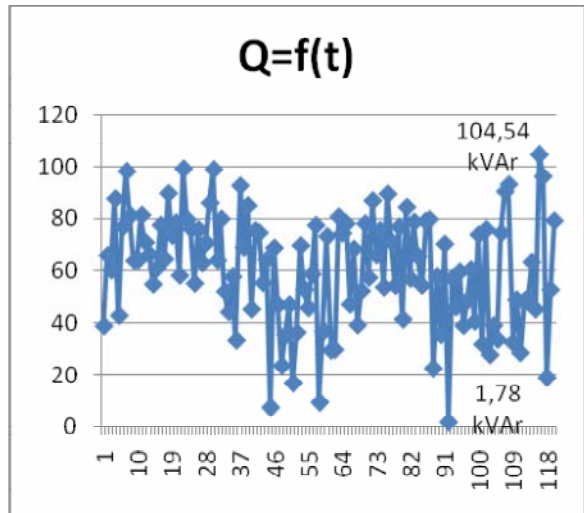
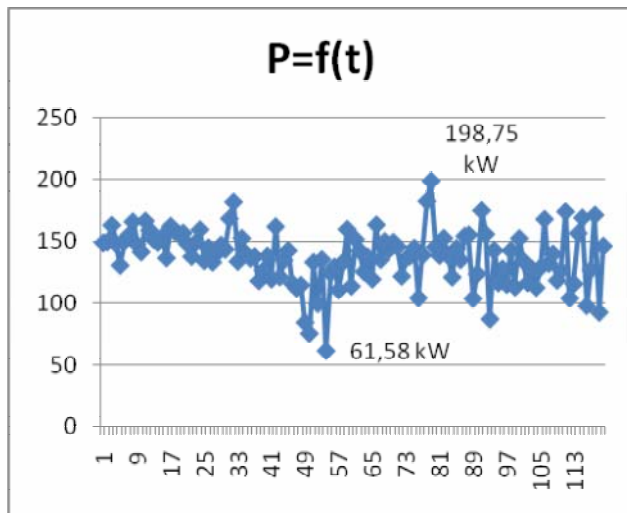
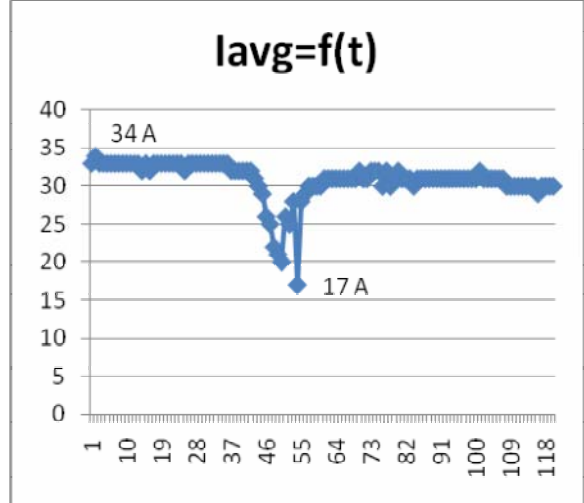
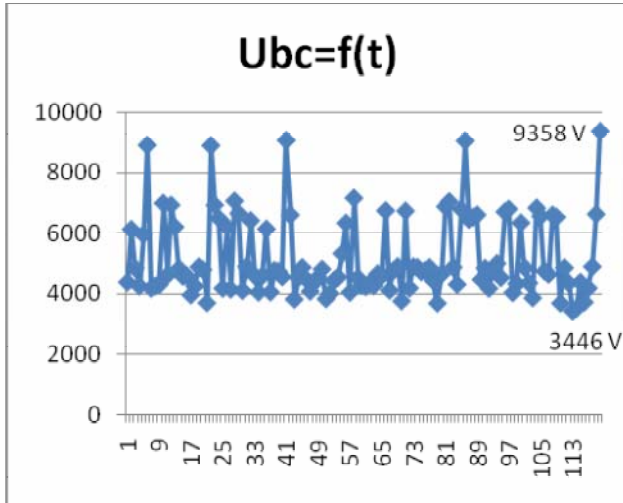


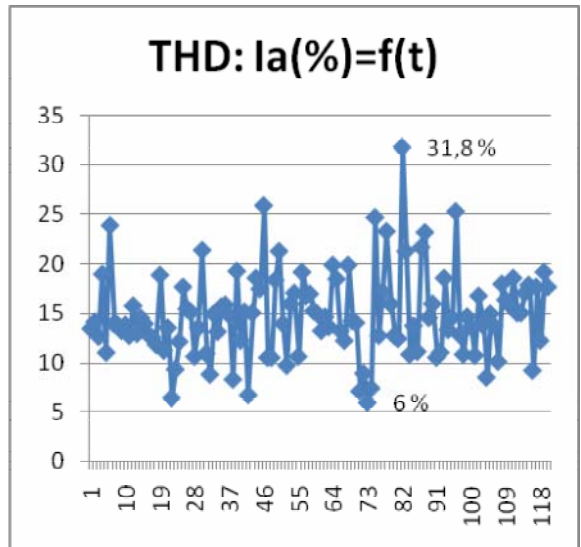
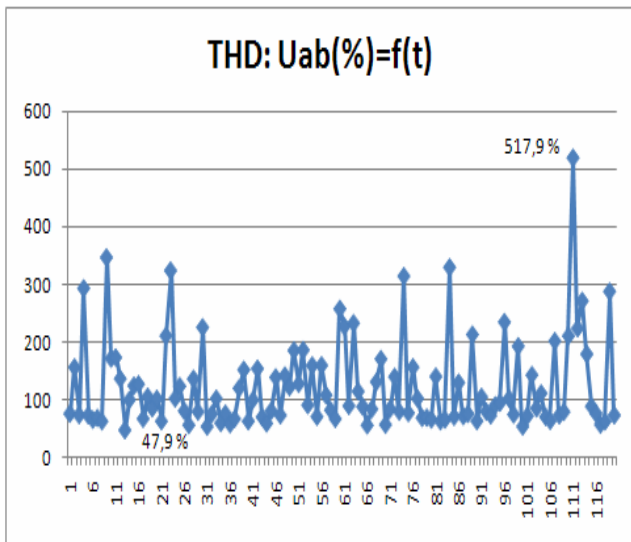
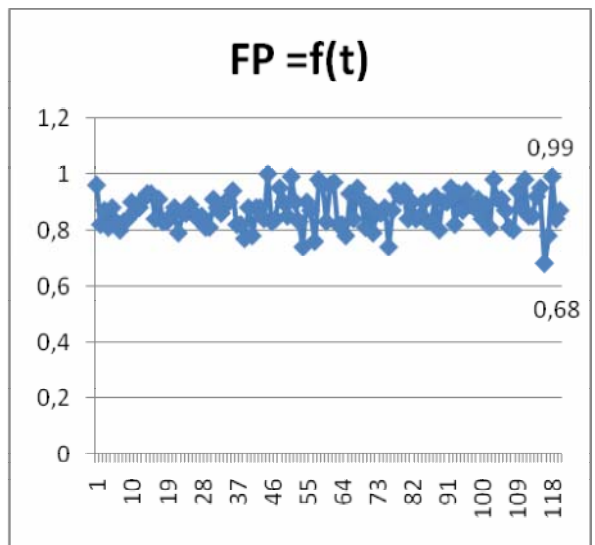
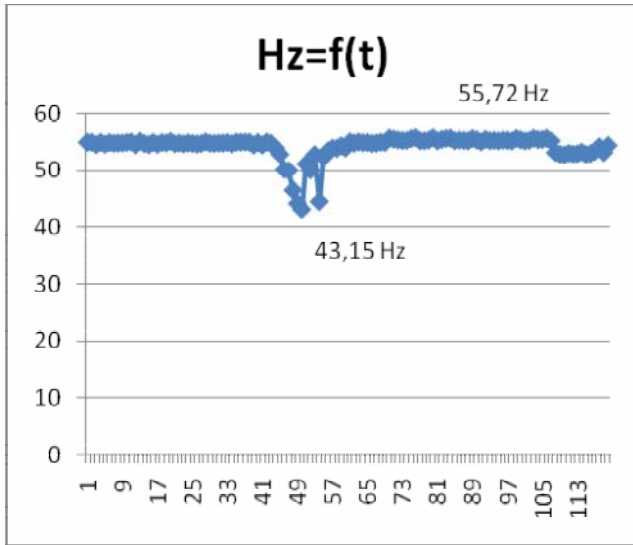
Anexo 2.3f Medición en el transformador de fuerza, lado de media tensión (4, 16 kV).

Mediciones a la salida del Transformador								
Rango	Tiempo	P3	Q3	FP	THD: Ia	THD: Ib	THD: Ic	THD: Uab
#	(s)	(kW)	(kVAr)	(cosΦ)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	0	118,79	32,51	0,94	16,4	19,3	10,8	79,5
2	1	126,77	48,86	0,88	15,9	19,2	16,8	210,5
3	2	174,2	28,55	0,98	18,6	12,7	18,1	517,9
4	3	104,32	48,1	0,85	15,1	7,3	14,2	223,6
5	4	116,08	49,52	0,85	15,1	10,3	14,6	270,7
6	5	156,63	63,28	0,92	17,1	17	20,1	179
7	6	169,2	45,23	0,95	17,9	10,5	19,5	88,8
8	7	98,07	104,54	0,68	9,3	18	17,4	76,7
9	8	127,36	96,13	0,78	17,7	18,1	17,4	57,5
10	9	171,41	18,76	0,99	12,3	16,2	19,5	62,9

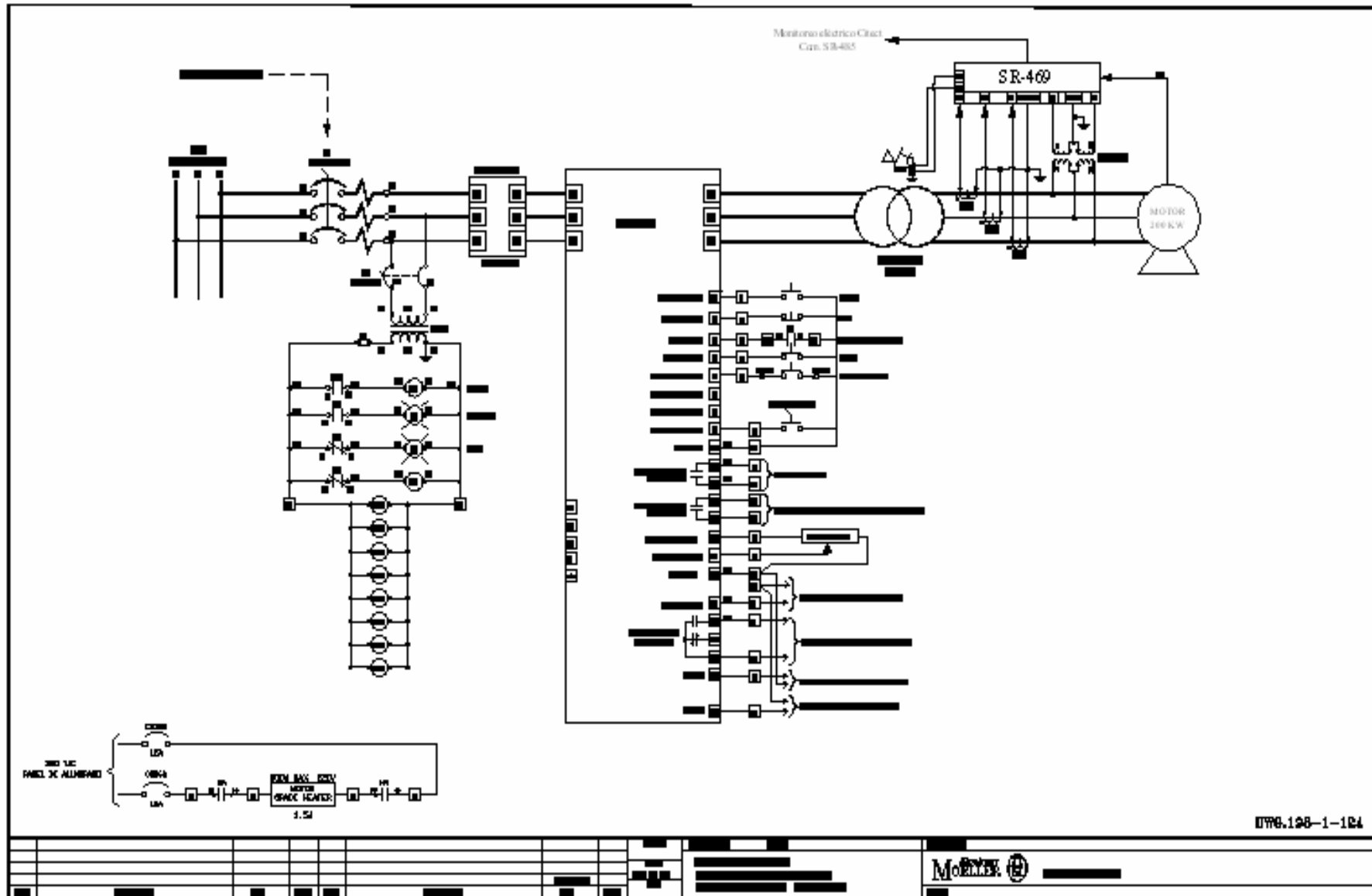
Mediciones a la salida del Transformador									
Rango	Tiempo	Corriente Ia	Corriente Ib	Corriente Ic	Corriente Iavg	Tensión Uab	Tensión Ubc	Tensión Uca	Frecuencia
#	(s)	(A)	(A)	(A)	(A)	(V)	(V)	(V)	(Hz)
1	0	30	30	30	30	4551	6540	3360	52,93
2	1	30	30	30	30	4235	3705	3963	52,8
3	2	30	30	30	30	4431	4867	4039	53,11
4	3	30	30	30	30	4437	4373	3956	52,95
5	4	30	30	30	30	4351	3446	4285	53
6	5	30	30	30	30	3711	3530	4210	53,32
7	6	30	30	29	30	5219	4395	4118	52,89
8	7	29	29	29	29	4198	3740	3963	53,04
9	8	30	30	30	30	5009	4204	4194	53,47
10	9	30	30	30	30	3717	4907	4127	54,26
11	10	30	30	30	30	4203	6639	3684	53,22

Anexo 2.3g Gráficos obtenidos partir de la base de datos de las mediciones en el transformador de fuerza, lado de media tensión (4, 16 kV)

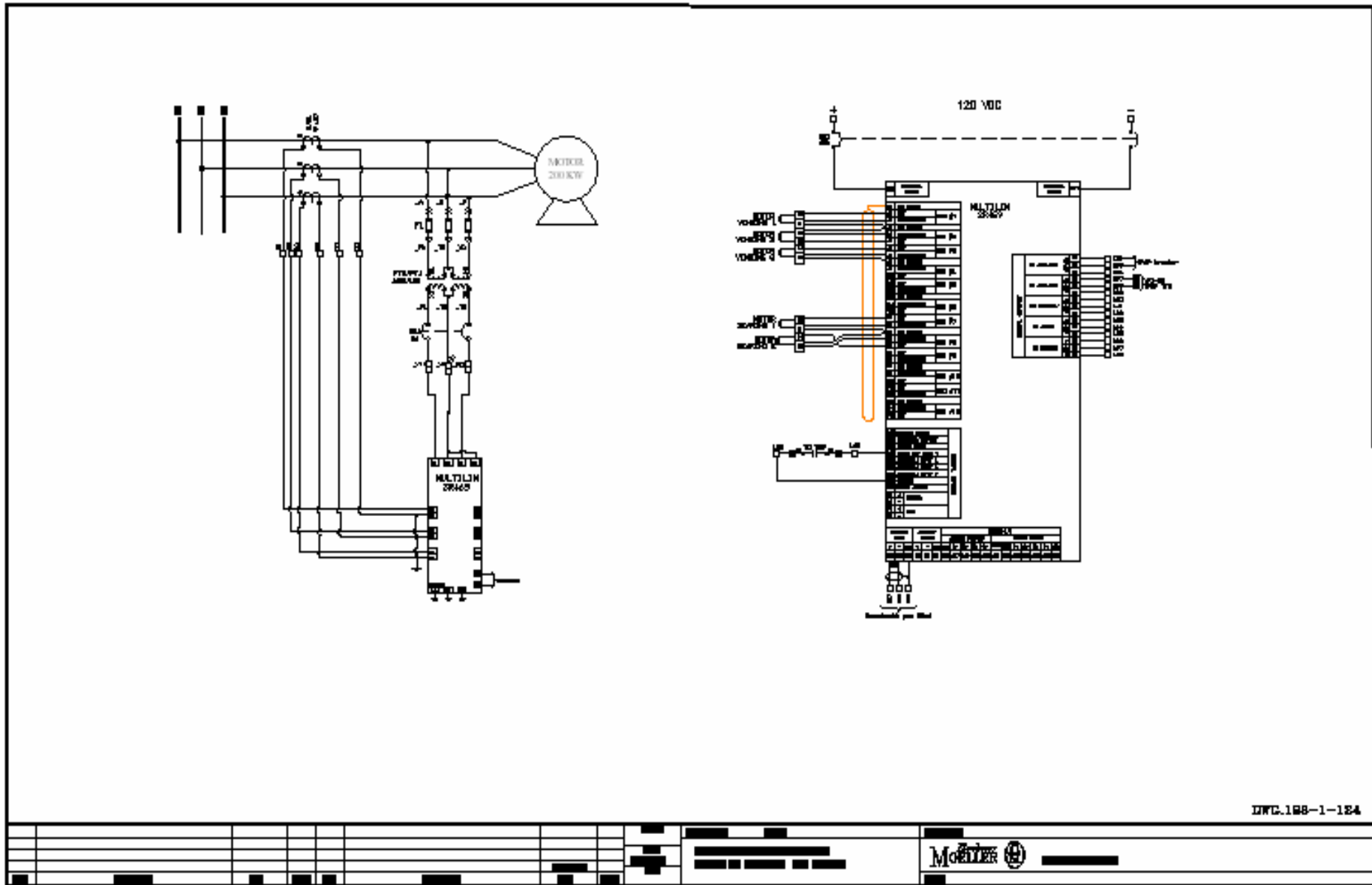




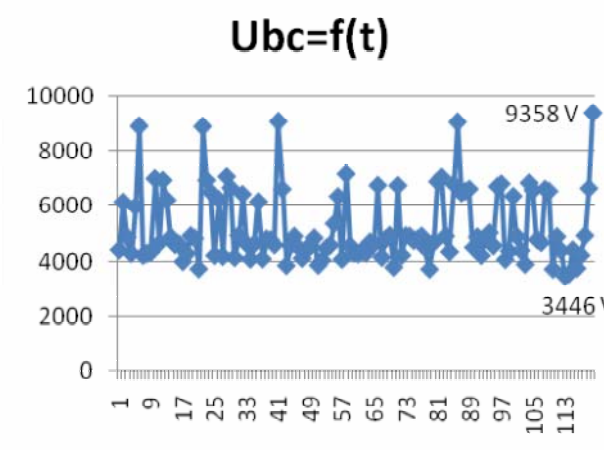
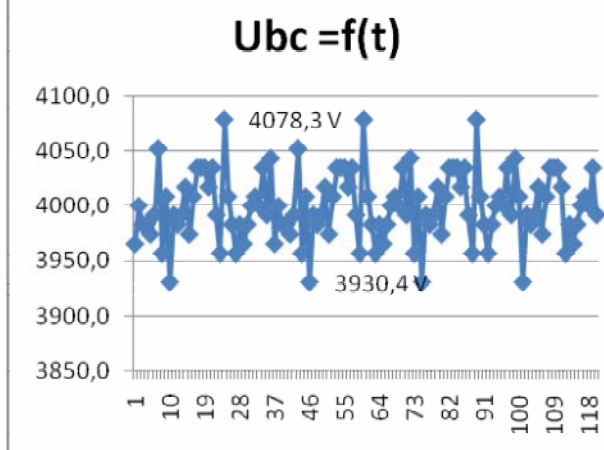
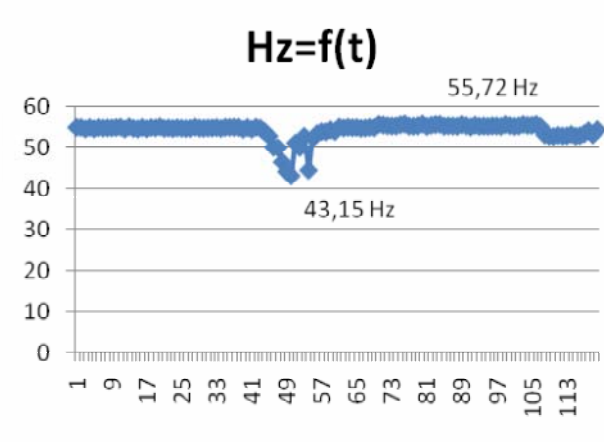
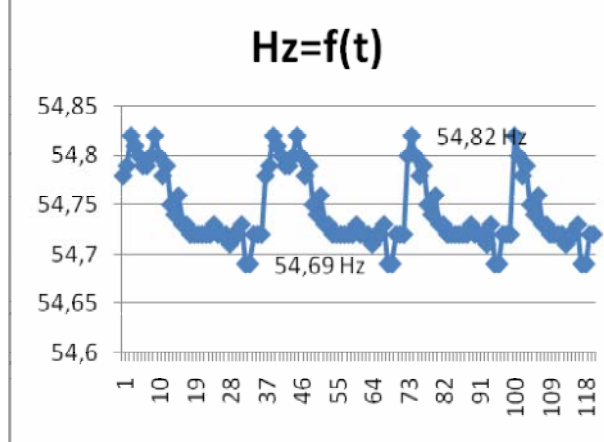
Anexo 3.1 a Esquema de propuesta para variador de velocidad F7.



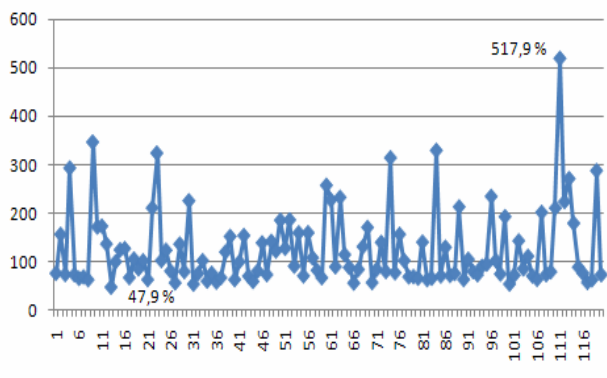
Anexo 3.1b Esquema de propuesta para el Multilin SR-469.



Anexo 3.2a Gráficos de comparación entre los parámetros de la red utilizando un transformador convencional y los de uno especial.

Sulfuros (Transformador convencional).	Lixiviación (Transformador especial).
<p>Secundario del transformador de fuerza (4,16 kV).</p>	<p>Secundario del transformador de fuerza (4,16 kV).</p>
<p style="text-align: center;">$U_{bc}=f(t)$</p>  <p>10000 8000 6000 4000 2000 0</p> <p>1 9 17 25 33 41 49 57 65 73 81 89 97 105 113</p> <p>9358 V 3446 V</p>	<p style="text-align: center;">$U_{bc} = f(t)$</p>  <p>4100,0 4050,0 4000,0 3950,0 3900,0 3850,0</p> <p>1 10 19 28 37 46 55 64 73 82 91 100 109 118</p> <p>4078,3 V 3930,4 V</p>
<p style="text-align: center;">$Hz=f(t)$</p>  <p>60 50 40 30 20 10 0</p> <p>1 9 17 25 33 41 49 57 65 73 81 89 97 105 113</p> <p>55,72 Hz 43,15 Hz</p>	<p style="text-align: center;">$Hz=f(t)$</p>  <p>54,85 54,8 54,75 54,7 54,65 54,6</p> <p>1 10 19 28 37 46 55 64 73 82 91 100 109 118</p> <p>54,82 Hz 54,69 Hz</p>

THD: Uab(%)=f(t)



THD: Uab(%)=f(t)

