

# TRABAJO DE DIPLOMA



República de Cuba  
Ministerio de Educación Superior

**FACULTAD METALÚRGICA-ELECTROMECAÁNICA**

**Ingeniería Eléctrica**

*Transferencia Informativa en Accionamientos  
Automatizados con Variador*

Diplomante

*René Leyva Noa*

Tutores

*Dr. Armin Marino Pérez,*

*Ing. Daniel Mendiola Ellis*

*Moa – 2006*

*“Año de La Revolución Energética en Cuba”*

# *Dedicatoria*

---

**Dedico el presente trabajo a:**

- **Mi madre Tomasa Noa Jardines**
- **Mi hermana Yenisey Leyva Noa**
- **Mi esposa y compañera Yanisleydis Góngora Leyva**
- **En especial a la memoria de mi único y gran padre René Leyva**

# *Pensamiento*

---

**“No existe en el mundo, nada mas poderoso, que una idea a la que ha llegado su tiempo”.**

***Víctor Hugo***

# *Agradecimiento*

---

**Agradezco profundamente a mis tutores: Ing. Daniel Mendiola Ellis que se preocupó siempre ante cualquier tarea y no dudó en apoyarme cuando lo necesité.**

**Gracias a Ing. Gilberto Acosta por su apoyo incondicional durante nuestra estancia en la empresa, a todo las técnicos e ingenieros del departamento eléctrico de la Emp. Pedro Sotto Alba, a Jared Moss y a todos lo que por su apoyo en todo momento hicieron posible la realización de este trabajo.**

***MUCHAS GRACIAS A TODOS***

## **RESUMEN**

---

El presente trabajo tiene como tema fundamental: TRANSFERENCIA INFORMATIVA EN ACCIONAMIENTOS AUTOMATIZADOS CON VARIADOR; se realizó con el objetivo principal de proponer un nuevo nivel de utilización de la información obtenida a partir de los datos de proceso según los datos obtenidos vía sistema SCADA para el accionamiento con variador.

En el primer capítulo, enmarcado en el Marco Teórico de la investigación se establecen algunos apuntes al mejoramiento de la Calidad de la Eficiencia y Calidad del Control, enfocada en el desarrollo de proponer un esquema de evaluación de la Calidad en los accionamientos.

En el segundo capítulo esta presente la Metodología de Análisis de todos los elementos que actúan en el sistema, enfocado al estudio de riesgo de la Calidad de la Energía (Influencias Armónicas).

En el tercer capítulo se desarrolla un modelo de simulación del sistema como herramienta, para obtener perfiles de eficiencia usando premisas estructurales.

## **SUMMARY**

---

The present work contains information based on the: TRANSFER OF INFORMATION IN AUTOMATIZED DRIVES WITH INVERTER. Its objectives are to propose a new way to utilize obtained information taken from SCADA, when working with inverter.

The first chapter; deals with the theory of investigation it establish some ways in bettering the efficiency quality and control quality by focusing on developing new schemes with respect to these drives.

The second chapter: represents the method of analyzing the information in the system focusing on the risks of energy quality. (Harmonic Influence).

The terser chapter: develops a simulation model of the system to obtain an efficiency profile of its structural process

## **INDICE**

---

INTRODUCCIÓN	I
CAPITULO I MARCO TEÓRICO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Accionamiento Eléctrico Automatizado para el Bombeo de Licor Producto	3
1.2.1 Accionamiento eléctrico de una bomba	5
1.3 El variador de velocidad	6
1.4 Aspectos sobre el control de velocidad	7
1.4.1 Fundamentos básicos del control de la velocidad por variación de la frecuencia	11
1.4.2 Control por variación de frecuencia utilizando un inversor de corriente	16
1.5 Descripción del objeto bajo estudio	19
1.6 Sistema SCADA-CITECT	23
1.7 Método de muestreo	23
1.8 Valoraciones sobre trabajos anteriores y el tratamiento sobre el tema	24
1.8.1 Métodos para variar la velocidad en los motores de inducción	24
1.9 Formalización de las tareas y su proyección	25
CAPÍTULO II METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	27
2.1 Introducción	27
2.2 Control y regulación de la velocidad en motores asincrónicos trifásicos	27
2.2.1 Cambio de frecuencia	29
2.2.2 Control de la frecuencia de línea	30
2.3 Origen de los armónicos	32
2.3.1 Principales perturbaciones por armónicos de corriente y voltaje	35
2.4 Modelo del variador de velocidad - Motor de inducción	39
2.4.1 Medidas a tener para realizar mediciones al variador de velocidad	40
2.5 Estudios sobre Armónicos en las redes	41
2.6 Medición y Monitoreo	43

2.7 Extracción y Selección de Fuentes de Información	43
2.7.1 Mejoramiento de la eficiencia desde esquema de control	45
2.7.2 Fundamentos tecnológicos de la regulación de velocidad en motores	45
2.7.3 Funcionamiento del motor asíncrono alimentado por convertidores	48
2.7.4 Estrategias de Control en Accionamientos	49
2.8 Observaciones y Sugerencias Metodológicas	50
<u>CAPÍTULO III</u>	50
PROPUESTAS EVALUADORAS Y EXPERIMENTACIÓN CON VARIANTES	50
3.1 Introducción	50
3.1.1 Árbol de Perfiles	50
3.2 Eficiencia en el accionamiento	51
3.2.1 Eficiencia en las bombas centrífugas	51
3.3 Premisas estructurales	55
3.3.1 Estructura	57
3.3.2 Facilidades a partir de esta estructura	58
3.4 Simulación como herramientas para elaborar perfiles de eficiencia	61
Conclusiones	67
Recomendaciones	68
Referencias Bibliográficas	69
Anexos	



## **INTRODUCCIÓN**

---

El incremento del nivel de procesamiento y la incorporación de nuevos órdenes de información, control y medidas de optimización constituyen objetos constantes de trabajo en cualquier proceso industrial y se verifica en todas las áreas; con particular fuerza en las referidas a la energía y su calidad. Luego, la profundidad y la continuidad de las decisiones toman mayor alcance, sincronización e independencia; dado que con el aumento de la cantidad de datos que se procesan también pueden hacerse la eficiencia y la calidad.

La ingeniería de nuestros días sustenta la necesidad de implementación de sistemas de control con tecnología y soluciones a la medida que permitan evaluar la eficiencia de los accionamientos industriales, lo que combinado con los estándares de ingeniería obliga a la creación de criterios y algoritmos.

La obtención de níquel en la empresa Moa Nickel S.A "Pedro Soto Alba" está conformada por procesos materiales, de transporte, hidráulicos, neumáticos y químicos, y en su centro los procesos energéticos, de control y los informativos. Existen también procesos confluentes, y uno de estos es el proceso de control de suministro de licor producto; el cual establece vínculos directos entre las plantas de sulfuro, de lixiviación y de neutralización; entre las que se establece una suerte de metalazo de control con bootstrap, o sea, independiente de otras relaciones el vínculo implica que cualesquiera variaciones de alguna se reflejen como arrastre en el comportamiento de las otras.

En esta empresa la conservación de los parámetros operacionales en los accionamientos eléctricos de los procesos metalúrgicos ha incorporado varias modificaciones modernizadoras entre las que se cuentan la introducción de redes de control y protección con soporte informativo y la introducción de controladores basados en variadores de velocidad y autómatas programables, todo ello coordinado por un sistema de control supervisorio y adquisición de datos. Estas modificaciones permiten automatizar las decisiones y a la vez crean las bases para nuevas medidas de optimización.

### Situación Problemática

La introducción del sistema SCADA CITECT en el proceso industrial de la empresa Moa Nickel S.A "Pedro Soto Alba" genera nuevos datos y relaciones tanto a nivel primario como secundario que constituyen recursos a explotar para optimizar las estructuras y los índices evaluativos existentes, así como generan interrogantes sobre el volumen y la utilización de almacenamiento, y de las relaciones entre los datos, también sobre la disponibilidad de secuencias históricas y las tendencias. Todo lo anterior hace recurrente la indagación sobre en qué medida se utilizan los datos, cuánta información generan y como tributan a diversos índices que requieren seguimiento, tales como la efectividad del proceso, su eficiencia y calidad energética y los ritmos de las tendencias detectables.

### Problema:

La estructura existente en los procesos de proceso de datos para evaluar la eficiencia en los accionamientos con variador del sistema de bombeo de licor que relaciona las plantas de neutralización, lixiviación y sulfuros no refleja los índices de calidad de la energía, ni da seguimiento a la eficiencia de los procesos de control en el bombeo de licor producto a la planta de sulfuros de la empresa Moa Nickel S.A "Pedro Soto Alba"

### Hipótesis:

- La sugerencia para adopción de un formato de transferencia de información en los accionamientos del sistema de bombeo de licor producto que usan la variación de velocidad con variadores de frecuencia permitirá dar seguimiento a la eficiencia;

- La existencia de una vía de obtención de índices de calidad de la energía permitirá evaluar y dar seguimiento a la eficiencia de los accionamientos eléctricos automatizados con variadores de velocidad para el bombeo de licor.

## Objetivo

Lograr una estructura evaluadora de información y seguimiento paramétrico de la calidad en accionamientos con variadores electrónicos de velocidad y su influencia en el entorno que lo circunda.

## Objetivos específicos

- Proponer un nuevo nivel de utilización de la información obtenida a partir de los datos de proceso, según los datos obtenidos vía sistema SCADA para accionamientos con variador de frecuencia.
- Cimentar la búsqueda y evaluación de índices de calidad que relacionen la efectividad de trabajo de los accionamientos con los índices de calidad de la energía, en particular la contaminación armónica.

## Tareas

- Obtención de datos de medición sobre el accionamiento con variador del bombeo de licor que conecta como un lazo de control las plantas de sulfuro, neutralización y lixiviación de la procesadora Moa Níckel S.A.
- Propuesta de estructura contenedora de medidas evaluadoras de la eficiencia para su seguimiento y portadora de datos que actúe sobre accionamientos e interactúe en redes informáticas.

## Tareas específicas

- Descripción de funcionamiento, interfaz de comunicación, parámetros de accionamiento y entorno del tanque de licor.
- Análisis del muestreo, seguimiento y reflejo en el sistema SCADA – CITECT de los accionamientos con variador de velocidad asociados al tanque de licor para definir medidas de procesamiento.
- Análisis de las relaciones entre información de intercambio SCADA-variador y su posible algoritmización.
- Análisis de la contaminación armónica por medio de la simulación y su uso para el cálculo y seguimiento de la eficiencia para un accionamiento.

## CAPITULO I MARCO TEÓRICO

---

### 1.1 Introducción

Las variables fundamentales para la evaluación de regímenes y la búsqueda de regularidades en procesos industriales que usan accionamientos eléctricos automatizados pueden generar campos de investigación que apuntan a:

- Mejoramiento de la Eficiencia
- Calidad de la Energía y Calidad del Control
- Esfuerzo Informativo y Memoria de Procesos
- Incorporación de Inteligencia

En el caso del accionamiento para transporte de fluidos las variables eléctricas se determinan sobre el comportamiento mecánico, aún cuando los regímenes sean diseñados de acuerdo al progreso mecánico.

Se estima que en el mundo más del 60% de la energía eléctrica generada es consumida por las máquinas eléctricas, por lo que al menos un 20% del ahorro de energía se ubica en el mejoramiento de los rendimientos de los motores y sistemas eléctricos, el otro 80% puede ser tomado de cada una de las partes del accionamiento eléctrico, incluyendo sus cargas mecánicas y el propio proceso [Rojas, P. L, 2006.].

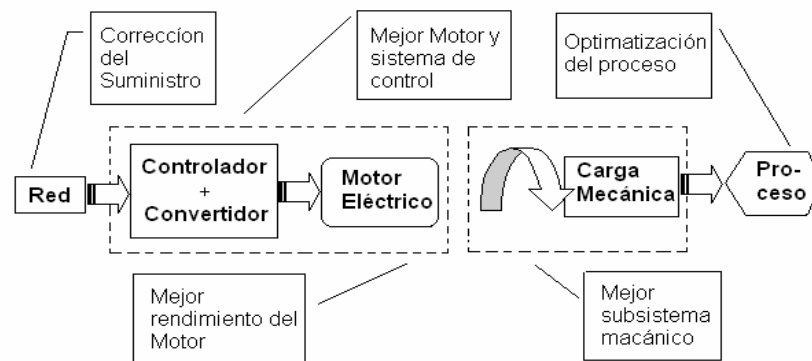


Figure 1.1.1 Sistema de accionamiento eléctrico. Oportunidades de mejoramiento

La aplicación de esta representación a distintos sistemas puede estudiarse para el logro de un mejor aprovechamiento en uso de la energía transferida desde la red de potencia trifásica en sus cuatros principales componentes.

- Fuente de suministro de potencia trifásica, usualmente los análisis parten de un sistema trifásico estable simétrico, con tensiones y corrientes sinusoidales y contenido de armónicos.
- Subsistema: Controlador + Convertidor + Motor Eléctrico, cuyo estudios utilizan por base resultados de simulación.
- Subsistema Mecánico, constituye la carga mecánica rotacional del accionamiento.
- Subsistema Proceso, nuestro caso la instalación bombeo de licor. Constituye alrededor del 35% de las oportunidades para mejorar el rendimiento de todo el sistema de accionamiento.

El análisis del rendimiento en base a las mediciones de potencias y sus perdidas ofrece una idea integral el uso de la energía y posibilita la búsqueda de mejores herramientas para evaluar los parámetros y variables de los objetos Convertidor + Motor Eléctrico y Motor Eléctrico + Carga Mecánica.

Un accionamiento de bomba es muy típico en cualquier instalación industrial y en la nuestra es de vital importancia.

En muchos complejos industriales, los motores de inducción son controlados mediante convertidores de frecuencia con la técnica de control U/f, la cual se basa en el mantenimiento de una relación Volts – Hertz (U/f) apropiada para la demanda par exigido por la carga; estos accionamiento tienen flexibilidad de configuración para adaptarse a las necesidades de la carga pudiendo el usuario especificar la curva U/f deseada. Sin embargo, la mayoría de las veces no se conocen los criterios prácticos de ajuste de la curva U/f, lo que no permite explorar al máximo las posibilidades del accionamiento.

## 1.2 Accionamiento Eléctrico Automatizado para el Bombeo de Licor Producto

Un accionamiento característico para nuestra planta presentaría diferentes elementos, es decir; breaker con su protección térmica, el variador de velocidad propuesto en dependencia de los parámetros del motor a utilizar, un PLC anexado al variador de velocidad trabajando a una corriente de 4-20 mA y el motor que accionará la bomba centrífuga (BC).

El accionamiento eléctrico de BC esta compuesto por el subsistema eléctrico de convertidor de frecuencia (VSI a PWM) + Motor de inducción (MI) que le entrega potencia mecánica rotacional en el árbol de la bomba centrífuga (BC).

El subsistema mecánico consiste en el grupo BC y el hidrotransporte constituido por la red hidráulica de tuberías, válvulas, codos, recipientes de llenado.

La potencia electromagnética desarrollada por el motor eléctrico tiene que equilibrar el torque de carga de la bomba centrífuga y el momento dinámico que se encarga de caracterizar el estado transitorio de todo el accionamiento, tal como se expresa en la formula siguiente:

$$M_{em} - M_c = J \frac{d\Omega}{dt} + B\Omega \quad (1.2.1)$$

donde:

$M_{em}$  – momento electromagnético del MI, [N.m]

$M_c$  – momento resistivo de la carga de la BC, [N.m]

$J$  – momento de inercia de las partes móviles del accionamiento, [kg.m/s<sup>2</sup>]

$\Omega$  - velocidad angular de rotación del árbol del MI, [rad/s]

$B$  – coeficiente de fricción de los rodamientos del MI

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (1.2.2)$$

donde:

$P_{em}$  – potencia electromagnética de motor de inducción, [kW]

$$M_{em} = \frac{N_b}{\Omega} \quad (1.2.3)$$

donde:

$N_b$  – potencia mecánica desarrollada por la bomba, [kW]

$$N_b = \frac{H^* Q^* \gamma}{102 * \eta_b} \quad (1.2.4)$$

El más simple y mas grande contribuidor a la eficiencia de la bomba centrífuga BC es su sobre dimensionamiento, y esta depende del criterio o los criterios que se sigan para seleccionar su potencia de trabajo.

Lo más usual para el trabajo con variable en la de la bomba es utilizar una válvula de estrangulamiento ya sea en su tubería de succión o en la de impulsión. Esta trae consigo perdidas hidráulicas que aportan un sobre consumo de energía en todo el sistema electro-hidráulico.

La eficiencia de todo el accionamiento va a depender entonces de los rendimientos tanto del motor MI como de la bomba BC en la manera de comportarse sus parámetros de operación.

La bomba convierte dentro de su rodete de trabajo la energía mecánica rotacional en energía de presión para mover el fluido de una altura de presión a otra, y que para el caso de la bomba centrífuga BC, que posee un impelente circular que transmite desde el ojo o centro la energía directamente al fluido, es decir, el fluido es empujado por la fuerza centrífuga desarrollada por el impelente que recibe la energía rotacional desde el árbol del accionamiento, y la incrementa en la medida de sus dimensiones físicas.

### **1.2.1 Accionamiento eléctrico de una bomba**

A partir de la ecuación (1.2.5), y la existencia de más de seis bombas, relacionamos los elementos que más nos acerquen para poder accionar a la medida.



$$P = \frac{k \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{h_b \cdot h_{tr}} * 10^3 \quad (1.2.6)$$

P - potencia del motor eléctrico, [kW]

k - coeficiente de seguridad igual a 1,1: 1,15

Q -caudal de trabajo de la bomba, [m³/h]

$\gamma$  - peso de un metro cúbico de líquido; agua = 9810 [N/m³]

H – altura de presión de la bomba, [m]

$h_b$  – rendimiento de la bomba, [0,6 – 0,8]

$h_{tr}$  – rendimiento de la transmisión

$$H = H_a + 9 * 10^{-4} \frac{v^{11.75}}{d^{1.25}} L + \sum \lambda \frac{v^2}{2g} \quad (1.2.7)$$

H – altura de presión desarrollada por la bomba, [m]

$H_a$  – altura de alimentación de la bomba, [m]

v – velocidad del fluido en la tubería, [m/s]

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \quad (1.2.8)$$

d – diámetro de la tubería, [m]

L – longitud de la parte horizontal de la tubería, [m]

g – aceleración de la gravedad, 9,81 [m/s²]

$\lambda$  – coeficiente de pérdidas de presión, 0,5 válvulas, 0,063 registros, 2 para las uniones en T y las rejillas

### 1.3 El variador 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 de los mismos. Es el único control que energiza, protege y permite la variación de la velocidad en el motor, sin ningún accesorio extra entre el motor y la carga. La ventaja principal de los variadores de velocidad es que disminuyen los consumos de energía eléctrica en algunos de los procesos que controla, dando como resultado considerables disminuciones de costos de operación. Sin embargo, existe aún cierto desconocimiento sobre cómo localizar las averías relacionadas con los variadores de velocidad, incluyendo los motores, qué tipos de herramientas de medida hay que utilizar y cómo realizar las medidas, empezando por las más sencillas hasta llegar a aquéllas que requiere herramientas de visualización de la forma de onda, todo ello encaminado a reducir el tiempo de localización de la avería, y por tanto, el tiempo de paro de la máquina.

Correlacionados con los variadores de velocidad (ASD) se encuentran una amplia variedad de motores controlados mecánica, neumática y electrónicamente, de velocidad variable. Para los motores de inducción de CA controlados electrónicamente se suele utilizar otro término: el de accionamiento de frecuencia variable, ya que, en este caso, se varía la frecuencia de la tensión aplicada al motor para cambiar su velocidad. En la figura 1.6 se muestra el diagrama de bloques de un variador de velocidad. El convertidor de entrada transforma corriente alterna sinusoidal en CC, necesaria para los transistores de potencia, controlados electrónicamente, del inversor de salida.

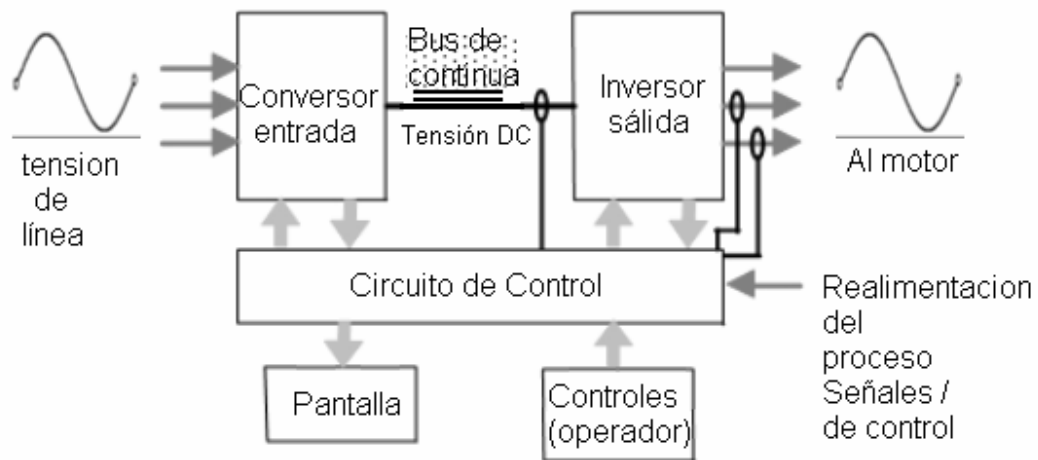


Figura 1.3.1 Diagrama de bloques de un variador de velocidad.

El inversor de salida proporciona una tensión y una frecuencia variables en CA. La tensión y la frecuencia (V/Hz) se varían a la vez para obtener un par constante de velocidad variable, o se varían en distinta proporción para obtener un par variable a distintas velocidades.

#### 1.4 Aspectos sobre el control de velocidad

Se refiere como control de velocidad al cambio intencional de esta variable en el accionamiento eléctrico con el objetivo compuesto de mantener en consigna un conjunto de coordenadas mecánicas que incluyen velocidad, aceleración, posición, momento angular y que pueden identificarse como grados de libertad condicionados. [Costa Montiel, 2005]

#### REQUERIMIENTOS IMPUESTOS POR EL MECANISMO.

Estos requerimientos pueden resumirse en seis INDICADORES o parámetros fundamentales que sirven también para evaluar cada tipo de variador o sistema de accionamiento eléctrico de velocidad variable. Estos requerimientos son:

- 1- El diapasón de control de la velocidad.
- 2- La gradación del control.
- 3- La exactitud en estado estacionario.

4- La calidad de la respuesta transitoria.

5- La dirección del control.

6- La carga permisible.

*Estos son los INDICADORES TÉCNICOS. Existen además INDICADORES ECONÓMICOS que siempre deben ser evaluados y son, fundamentalmente, dos:*

1- La inversión inicial.

2- El costo de explotación.

Algo más detallados se relacionan como sigue:

**1- El diapasón de control de la velocidad** se determina dividiendo la velocidad máxima de operación necesaria entre la mínima:

$$D = \frac{\omega_{m.\max}}{\omega_{m.\min}} \quad (1.4.1)$$

Casi siempre el diapasón se expresa en forma de proporciones tales como 4:1, 20:1, etc.

**2- La gradación del control** indica la cantidad de velocidades estables de operación del método y se expresa cuantitativamente mediante el factor de gradación:

$$K_{gr} = \frac{\omega_{m.n}}{\omega_{m.n-1}} \quad (1.4.2)$$

siendo  $\omega_{m.n}$  la velocidad en el paso n del control y  $\omega_{m.n-1}$  la velocidad en el paso n-1.

*Este indicador da idea de lo continuo (suave) o discreto que es un método de control de velocidad*

**3- La exactitud en estado estacionario** se refiere a las variaciones que ocurren en la velocidad. Este indicador se evalúa a través de la denominada

RIGIDEZ DE LA CARACTERÍSTICA MECÁNICA A CARGA NOMINAL,  $\beta_N$ .

La rigidez de la característica mecánica se define, en general, como:

$$\beta = -\frac{dM}{d\omega_m} \quad (1.4.3)$$

Según la característica el valor de  $\beta$  puede ser igual al inverso de la pendiente de la característica mecánica en cada punto y debe evaluarse para la carga nominal o si la característica es lineal y descendente, la rigidez es constante e igual a:

$$\beta = -\frac{M_N}{\Delta\omega_m} = -\frac{M_N}{(\omega_o - \omega_{mN})} \quad (1.4.4)$$

Aunque este parámetro depende de la variación de la velocidad con la carga, no siempre es el mejor para evaluar este indicador, sobre todo cuando el diapasón de control es grande. Para tener en cuenta este elemento es mejor evaluar el denominado PORCIENTO DE ESTATISMO de la característica, que se define como:

$$\%S = \frac{\omega_o - \omega_{m.n}}{\omega_o} \cdot 100 \quad (1.4.5)$$

y, si la característica es lineal:

$$\%S = \frac{M_N}{\beta \cdot \omega_o} \cdot 100 \quad (1.4.6)$$

*A mayor porcentaje de estatismo peor es la exactitud de la característica.*

**4- La calidad de la respuesta transitoria** se refiere a la forma de la respuesta de la velocidad en función del tiempo cuando varía el COMANDO DE CONTROL. Este indicador tiene dos aspectos a considerar: la RAPIDEZ DE RESPUESTA y la OSCILATORIEDAD o ESTABILIDAD RELATIVA. La rapidez de respuesta se refiere al tiempo en el que se alcanza un nuevo estado estacionario y la estabilidad relativa, al nivel de amplitud de las

oscilaciones de la velocidad durante el período transitorio y el tiempo en que ellas se mantienen.

**5- La dirección del control** se refiere a si la velocidad puede variarse por encima, por debajo o en ambos sentidos de la velocidad base, la cual es la correspondiente a la característica mecánica natural en condiciones nominales.

**6- La carga permisible** se refiere al tipo de carga mecánica que debe ser accionada por el variador de velocidad. Esta clasificación puede hacerse en base a tres criterios:

#### **6.1- Sentido de rotación:**

Existen dos tipos de cargas: las NO REVERSIBLES, que sólo giran en un sentido, y las REVERSIBLES, que pueden girar en ambos sentidos.

#### **6.2- Carácter de la carga:**

Se dice que es una CARGA PASIVA cuando sólo consume energía del accionamiento eléctrico y que es una CARGA ACTIVA, cuando puede tanto consumir como entregar energía al accionamiento eléctrico. Este es el caso de los mecanismos o cargas sometidos a la acción de la gravedad, tales como las grúas y los ascensores o mecanismos de elevación.

#### **6.3- Relación momento-velocidad. Existen cargas de:**

Momento constante:  $M_c = cte.$

Momento variable:  $M_c = M_o + M_1 \cdot \omega_m + M_2 \cdot \omega_m^2$

Potencia constante:  $P = M_c \cdot \omega_m = cte.$

Por ejemplo: Un ascensor o elevador es una carga reversible, activa y de momento constante; una bomba centrífuga es una carga no reversible, pasiva y de momento variable.

A veces en este punto se especifica también la aceleración máxima o el momento máximo necesario para obtenerla.

En cuanto a los *INDICADORES ECONÓMICOS*, estos son la *INVERSIÓN INICIAL* y el *COSTO DE EXPLOTACIÓN*. Existen métodos que permiten, realizando un estudio económico comparativo decidir, por una parte el tipo de variador de velocidad que debe seleccionarse (si esto es necesario, ya que en muchos casos la experiencia indica cual es el mejor) y, por otra, garantizar la *FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONOMICA* del proyecto, lo cual siempre debe hacerse independientemente de que se conozca de antemano el tipo de variador a utilizar.

#### **1.4.1 Fundamentos básicos del control de la velocidad por variación de la frecuencia**

Como se sabe, la velocidad sincrónica, en radianes por segundo, del campo magnético giratorio de un motor de inducción trifásico, está dada por:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{(P/2)} \quad (1.4.7)$$

donde:

P- es el número de polos del motor.

La velocidad del rotor del motor es ligeramente menor que la sincrónica y está dada por:

$$\omega_m = \omega_s \cdot (1 - s) \quad (1.4.8)$$

donde:

s-es el deslizamiento del motor que varía generalmente, en condiciones estables de trabajo, entre 0,005 y 0,1.

Quiere decir que si se varía la frecuencia de trabajo del motor de inducción, puede variarse su velocidad de rotación. Para controlar por debajo de la velocidad base debe reducirse la frecuencia  $f_1$ . Ahora bien, recuérdese que la fem inducida en el devanado del estator depende de la frecuencia.

Según la ecuación:  $E_S = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_S \cdot K_{devS} \cdot \phi_m$

Por otra parte, del circuito equivalente del motor se obtiene que el fasor de la tensión aplicada en el estator por fase, es igual a:

$$\bar{U}_S = \bar{E}_S + j\bar{I}_S \cdot (R_S + jX_S) \quad (1.4.9)$$

A frecuencias cercanas a la nominal la caída en la impedancia interna del estator es despreciable y puede suponerse aproximadamente igual a la fem;

$$\bar{U}_S \approx \bar{E}_S$$

Quiere esto decir, que si la frecuencia disminuye y la tensión no varía, el flujo  $\phi_m$  aumenta, provocando la saturación de la máquina y el consiguiente aumento de la corriente magnetizante y las pérdidas del motor a valores inadmisibles. Por lo tanto, es recomendable operar de forma tal que, al reducirse la frecuencia, la tensión se reduzca proporcionalmente, o sea, con la LEY DE MANDO TENSIÓN / FRECUENCIA CONSTANTE:

$$\frac{U_S}{f_1} = K_{u,f} \quad (1.4.10)$$

Por lo antes expuesto se comprende que para realizar en la práctica este método es necesario disponer de un INVERSOR TRIFÁSICO, el cual es un dispositivo que convierte corriente continua en corriente alterna trifásica, mediante el cual puede controlarse independientemente tanto la tensión como la frecuencia. Al conjunto formado por el inversor y su control de tensión y frecuencia suele denominársele MODULADOR.

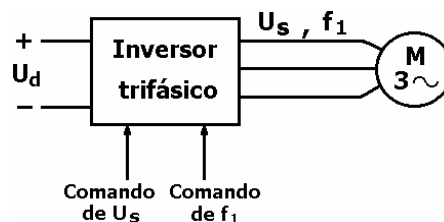


Figura 1.4.1 Esquema de control de la frecuencia.

En la figura 1.4.1 se muestra cómo varía la característica mecánica del motor al reducir la frecuencia con esta ley de mando. . Para evitar a menor flujo, la caída



de la capacidad de sobrecarga o momento máximo cae debe trabajarse el motor con la LEY DE MANDO A FLUJO CONSTANTE, en la cual se cumple que:

$$\frac{E_s}{f_1} = K_{\phi, f} \quad (1.4.11)$$

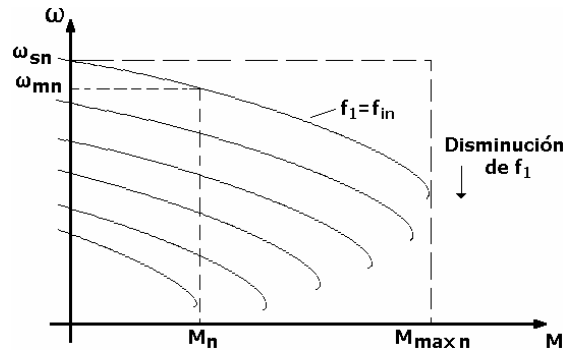


Figura1.4.2 Características mecánicas con ley de mando U/f constante.

Se pueden obtener gráficas de variación de las características con esta ley de mando, donde la capacidad de sobrecarga se mantiene constante y apreciar cómo debe variar la tensión en función de la frecuencia para obtener esta ley de mando.

Para trabajar con valores de velocidad por encima del nominal es necesario aumentar la frecuencia de alimentación, pero la tensión no puede ser aumentada por encima de la nominal. Esto hace que el flujo, la capacidad de sobrecarga y el momento nominal, disminuyan, operándose en la zona de trabajo de DEBILITAMIENTO DEL CAMPO, la cual es una zona de POTENCIA CONSTANTE.

Para las cargas de momento constante debe utilizarse una ley de mando de flujo constante. Es interesante determinar en este tipo de carga las expresiones para la corriente del estator, el deslizamiento (y la velocidad) y la tensión aplicada en el estator en función de la frecuencia de alimentación, si se aplica esta ley de mando.

Como se trabaja en la zona estable de las características mecánicas, el deslizamiento es pequeño y se cumple que  $\frac{R_R}{S} \gg \omega_1 \cdot L_{f,R}$ , esto hace que la

corriente  $\bar{I}_R$  esté en fase con la fem inducida  $\bar{E}_S$ . Por otra parte, la corriente  $\bar{I}_M$  está en cuadratura con  $\bar{E}_S$  y, dado que el flujo se mantiene constante, esta corriente también es constante. La fem es igual entonces a:

$$\bar{E}_S = j\omega_1 \cdot L_M \cdot \bar{I}_M \quad (1.4.12)$$

La corriente del rotor es:

$$\bar{I}_R = \frac{\bar{E}_S}{\frac{R_R}{s}} = \frac{s \cdot \bar{E}_S}{R_R} \quad (1.4.13)$$

Combinando las expresiones anteriores y hallando el módulo:

$$I_R = \frac{s \cdot \omega_1 \cdot L_M \cdot I_M}{R_R} \quad (1.4.14)$$

Por otra parte, si se supone el momento de la carga igual al momento electromagnético (operación en estado estacionario):

$$M_c = M = \frac{3 \cdot (P/2)}{\omega_1} \cdot I_R^2 \cdot \frac{R_R}{s} \quad (1.4.15)$$

Sustituyendo (1.4.14) en (1.4.15) se obtiene:

$$M_c = K_M \cdot \omega_1 \cdot s \quad (1.4.16)$$

donde:

$$K_M = \frac{3 \cdot (P/2) \cdot (L_M \cdot I_M)^2}{R_R} \quad (1.4.17)$$

de (1.4.16):

$$s = \frac{M_c}{K_M \cdot \omega_1} = \frac{M_c}{2 \cdot \pi \cdot K_M \cdot f_1} \quad (1.4.18)$$

Como puede apreciarse, al disminuir la frecuencia aumenta el deslizamiento. Con el deslizamiento puede calcularse la velocidad del motor como:

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{(P/2)} (1-s) \quad (1.4.19)$$

En esta expresión la velocidad está en rad/s, si se quiere en r/min la ecuación es:

$$n_m = \frac{120 \cdot f_1}{P} \cdot (1-s) \quad (1.4.20)$$

Después de los arreglos pertinentes se obtiene:

$$I_R = \frac{M_c}{3 \cdot (P/2) \cdot L_M \cdot I_M} \quad (1.4.21)$$

Como se ve, la corriente del rotor es constante, por lo cual la corriente del estator es también constante e igual a:

$$I_S = \sqrt{I_M^2 + I_R^2} \quad (1.4.22)$$

Determinándose la tensión de fase:

$$U_{s,f} = \sqrt{(E_s + I_R \cdot R_s + \omega_1 \cdot L_{f,S} \cdot I_M)^2 + (\omega_1 \cdot L_{f,S} \cdot I_R - I_M \cdot R_s)^2} \quad (1.4.23)$$

Siendo aproximadamente:

$$U_{s,f} \approx E_s + I_R \cdot R_s + \omega_1 \cdot L_{f,S} \cdot I_M \quad (1.4.24)$$

La experimentación con relación a las expresiones anteriores se consolidan en la tabla como la que sigue, luego de obtenida la corriente del estator.

Frecuencia (Hz)	Deslizamiento (p.u.)	Fem (V)	Tensión (V)	Velocidad (r/min)
60	0.02	117,8	127,0	1760

45	0.03	78,4	85,5	1161
30	0.04	58,8	65,0	862
15	0,12	19,6	20,7	263

Tabla 1.4.1 Valores de la experimentación

### 1.4.2 Control por variación de frecuencia utilizando un inversor de corriente

En este tipo de accionamiento es utilizable el INVERSOR DE CORRIENTE, el cual se alimenta con una FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE. Para obtener dicha fuente se utiliza un rectificador controlado con realimentación de corriente y una inductancia elevada (Ver figura 1.4.3).

A diferencia del inversor de tensión, en este caso la corriente es la que tiene forma de pulsos rectangulares y la tensión se aproxima a una senoide, tal como se muestra en la figura 1.4.4. Este esquema tiene la ventaja de poder operar con facilidad en los cuatro cuadrantes, utilizar convertidores relativamente baratos y sencillos y proveer un alto momento de arranque. Tiene las desventajas de empeorar el factor de potencia, ser de respuesta lenta y poder trabajar con un solo motor. Se utiliza en grúas, transportadores, etc.

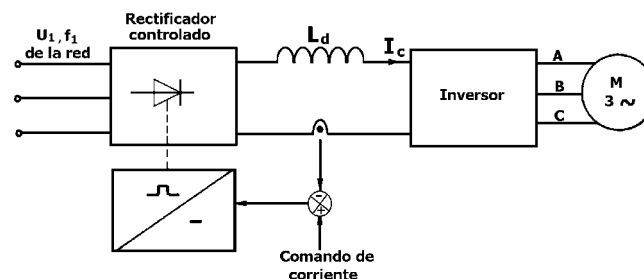


Figura1.4.3 Inversor de corriente.

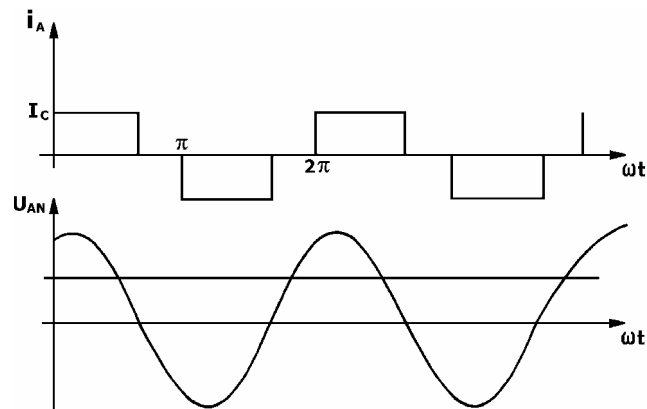


Figura 1.4.4 Tensiones y corrientes en el inversor de corriente.

La corriente de la fuente que aparece en la figura 1.4.2, es el valor efectivo de la componente fundamental de corriente de la figura 1.4.4, igual a:

$$I_S = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_C \quad (1.4.25)$$

Puede explicarse que si el motor trabaja en la zona estable de la característica, la corriente magnetizante es muy grande y se produce la saturación excesiva del circuito magnético, lo cual no es permisible debido al gran incremento de la corriente y las pérdidas. Esto quiere decir que este accionamiento tiene que operar siempre a lazo cerrado, con el objetivo de estabilizar su operación.

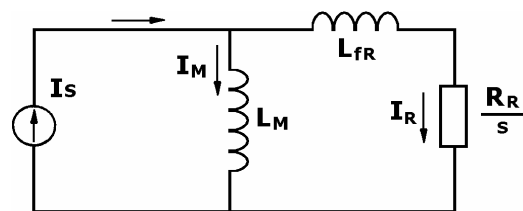


Figura 1.4.5 Circuito equivalente del inversor de corriente.

Para operar a flujo constante la corriente magnetizante  $I_M$  debe mantenerse también constante. Esto quiere decir que para cada valor de corriente  $I_S$  existe un valor de velocidad de deslizamiento  $\omega_{RS}$  que mantiene a la corriente

magnetizante en su valor nominal. Para determinar esta característica es mejor escribir (1.4.25) de la forma:

$$I_S = \sqrt{1 + [(P/2) \cdot \omega_{RS} \cdot T_R]^2} \cdot I_M \quad (1.4.26)$$

En la figura 1.4.6 se muestra la característica de velocidad de deslizamiento (en r/min) en función de la corriente del estator del motor, para mantener la corriente magnetizante en su valor nominal en el motor que se ha estado estudiando en este capítulo. Si el inversor es controlado por una microcomputadora esta característica se almacena en la memoria de la misma y para cada valor de carga se censa la velocidad de deslizamiento, se le suma la velocidad real del rotor y se obtiene, con esto, la frecuencia del inversor.

Para una carga de momento constante, la velocidad de deslizamiento es constante, al igual que la corriente del estator. Debe señalarse que velocidad de deslizamiento constante no significa deslizamiento constante.

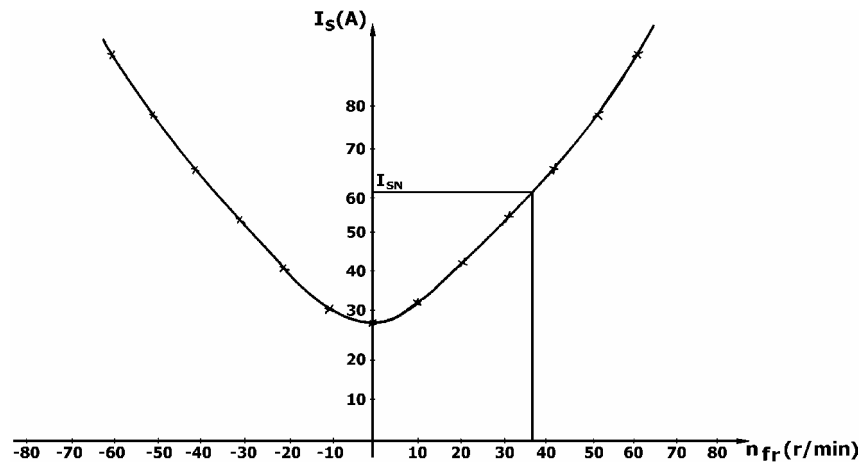


Figura 1.4.6 Característica corriente - velocidad de deslizamiento del inversor de corriente.

Se observa que las armónicas de corriente no dependen de la carga mecánica del motor. Esto quiere decir que, mientras menos carga tenga el motor mayor es la deformación de la corriente con respecto a una onda sinusoidal.

## 1.5 Descripción del objeto bajo estudio

El interés en este trabajo se centra en los problemas energéticos e informativos, que ocurren en el proceso de suministro de licor a la planta de sulfuro.

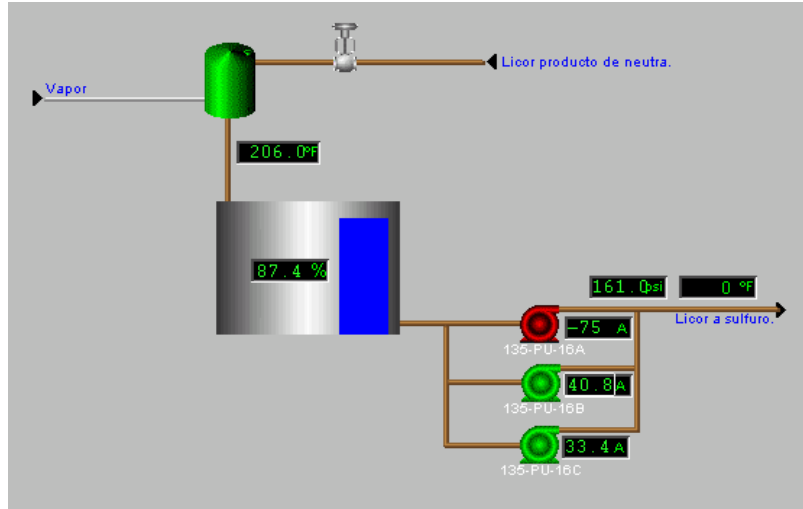


Figura 1.5.1 Vista SCADA de accionamientos con bombas en el tanque de licor.

Como se aprecia en la figura 1.5.1, existe a través del nivel del tanque de licor una relación entre los procesos en las plantas de lixiviación, neutralización y sulfuros.

Las figuras 1.5.2, 1.5.3 y 1.5.4 enfocan otras vistas SCADA desde otras plantas y permiten con algún ejercicio de abstracción lograr la visión del vínculo entre ellas.

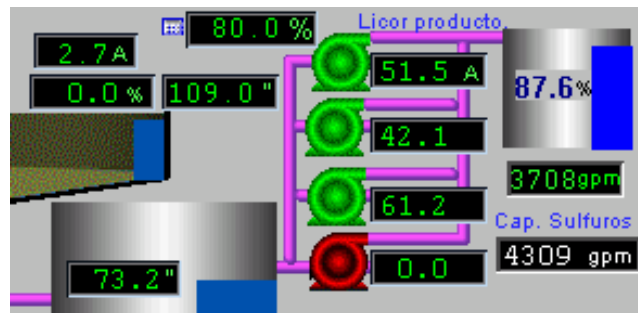


Figura 1.5.2. Vista como parte del proceso en la planta de neutralización. (Entrada).



Figura 1.5.3. Vista como parte del proceso en la planta de sulfuros (Salida).



Figura 1.5.4 Otra vista desde lixiviación.

De las figuras puede apreciarse también el problema distribuido entre el nivel del tanque, la operación de las bombas para alimentarlo y parte de suministro a la salida.

La complejidad obliga a particionar las tareas y esta propuesta nos conduce a una clasificación la información, la eficiencia y la calidad de la energía.

La red de información industrial incluye las funciones SCADA mediante el software CITECT, control y protección mediante una red de autómatas programables (PLC) y con interruptores electrónicos programables para protección, medición y monitoreo sobre un red basada en bus de campo MODBUS y flujo de datos sobre red Ethernet.

El control actúa sobre la tecnología de procesos metalúrgicos en los que se basa el proceso fabril y sobre elementos suministran la energía y el transporte de materiales de los accionamientos ha ido incorporando para los sistemas de bombeo diferentes procedimientos de control y su estado actual plantea el uso



de variadores de frecuencia para el control de velocidad en los motores que accionan las bombas alrededor del tanque de licor, fundamentalmente a su salida. El objetivo principal es mantener el nivel del tanque por debajo del punto de consigna y a la vez mantener el flujo de alimentación a los tanques de la planta de sulfuro

El accionamiento funciona de dos formas, es decir; de forma manual y de forma automática (remoto), si está trabajando (remoto) el control de variar la velocidad no opera para ningún sentido.

El accionamiento en la planta de sulfuro se compone entre otros por los elementos:

- Un breaker con la protección térmica correspondiente.
- Un variador de velocidad con voltaje de 480 V, 300 kW de potencia y trabajando a una frecuencia de 60 Hz.
- Un motor que acciona la bomba de licor que pertenece a la pizarra de 5 kV (4160 V).
- Un transformador elevador de 0.48/4.16 kV con un factor de potencia de 0.8, para lograr la conexión del variador a este sistema por la diferencia de tensiones que presentan el motor y el variador.
- Una regleta para las conexiones necesarias.
- Autoclaves (tanques).

[ver anexo 1]

Con este accionamiento se logra establecer en la planta de sulfuro un lazo cerrado de control entre la planta de neutralización, lixiviación y la planta de sulfuro para el flujo de licor a los autoclaves.

El interruptor (breaker) está implementado mediante el relé electrónico Multilin SR469 como instrumento de medición y protección sobre los motores que operan en el proceso bajo, que estudia y accionan a las bombas centrifugas. Este relé es el instrumento de protección y a la vez el instrumento de medición.

El SR 469 integra todas las funciones de protección que pueden ser necesarias para motores medianos y grandes.

El SR469 tiene funciones de monitoreo y medidas completas, midiendo los parámetros eléctricos con gran exactitud. Incorpora un registro de sucesos que guarda 40 registros etiquetados en tiempo y permite "capturas" oscilográficas de hasta 64 ciclos, permite la comunicación local, el acceso desde un ordenador a través de la interfaz RS232 y de puertos RS485 para comunicación remota y un software (469PC), que proporciona un acceso sencillo y directo al mismo [[www.GEindustrial.com/Multilin](http://www.GEindustrial.com/Multilin)].

## **1.6 Sistema SCADA-CITECT**

El CITECT es un software SCADA para la elaboración de programas de monitoreo y supervisión industrial, se usa esta herramienta de programación en una gran variedad de aplicaciones y en muchos procesos deferentes. Tiene una verdadera arquitectura lo cual permite gran flexibilidad para elaborar nuestros propios programas de monitoreo, pueden ser grandes o pequeños, asegurando que nuestras aplicaciones sean rápidas y eficaces.

El CITECT brinda muchas ventajas a los operadores o jefes de mantenimiento con la que se puede:

- Proporcionar mando central o local, con páginas programables de gráficas en donde se muestre de forma clara el estado de la planta.
- Se pueden agregar botones de mando, para realizar múltiples tareas.
- Cuenta con efectos gráficos de animaciones con lo que se puede desplazar el estado de operando en la planta.
- Posee con utilidades para la elaboración de programas en otros idiomas, pudiendo ser adaptable a cualquier otro.

Para los procesos relacionados en la empresa y vistos en 1.4 reflejarse en CITECT, se ha trabajado en criterios no suficientemente bien fundamentados de selección de variables; expresión de sus relaciones y presentación para

optimización de decisiones a través de la elaboración cuantificada de información.

### **1.7 Método de muestreo**

Para el análisis de los datos seleccionados se utilizó el método de muestreo Aleatorio Simple, considerando los parámetros fundamentales de proceso como perturbaciones típicas, velocidad de respuesta y para determinar la velocidad de proceso según las decisiones se adoptaron **Estimadores**.

*Estimadores consistentes*: son aquellos basados en procedimientos de estimación donde la magnitud de los errores de estimación probable se pueden reducir aumentando el tamaño de la muestra, hasta eliminarlo completamente.

*Tamaño de la muestra (n)*: al existir varias variables y parámetros de interés, debe decirse con anterioridad cual o cuales son los más importantes y en base a ellos determinar el tamaño de la muestra. Para ellos se toman los valores críticos de las variables en cuestión.

Este método proporciona: mayor rapidez, mayores posibilidades, mayor exactitud, menor costo.

### **1.8 Valoraciones sobre trabajos anteriores y el tratamiento sobre el tema**

En el entorno industrial la eficiencia de los accionamientos ha sido tratado desde varios enfoques y esto se refleja en la tesis doctoral [Rojas P. L, 2006], donde el tratamiento sobre el trabajo de bombas centrífugas acopladas a motores de inducción y con reglas de control difuso se proponen como una vía de incorporar inteligencia y además se enriquece la propuesta de relacionar la modulación para el control de variadores de frecuencia con las acciones y reacciones en el accionamiento.

De menor alcance pero también abarcadores se tienen los trabajos de [Cautín.O, Trabajo de Diploma, 2004], el que introduce a la articulación del hardware y su relación con el transporte y los experimentos para asociar la distribución funcional de los actores sobre la eficiencia y el trabajo [Torres. E,

Trabajo de Diploma, ISMM 2004] orientado a la algoritmización de la evaluación de la eficiencia, o su seguimiento, esto con un corte algo más académico, respecto a la base experimental de los primeros.

### **1.8.1 Métodos para variar la velocidad en los motores de inducción**

1. Cambio del número de polos
2. Cambio del deslizamiento
3. Regulación por impulsos
4. Cambio de frecuencia

Con este método de regulación (4) se puede obtener un amplio control de velocidades, con el máximo par disponible en todas las frecuencias con un elevado rendimiento. Si se prolonga la característica al cuadrante generador se puede obtener un frenado muy eficiente por reducción de frecuencia, con una recuperación de energía hacia la red de alimentación.

La modificación de la frecuencia se realiza fundamentalmente por medio de variadores estáticos electrónicos que ofrecen una regulación suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas y originando un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes.

Digamos que muchas veces el criterio de selección entre el uso de los distintos sistemas de regulación de velocidad pasa fundamentalmente por una consideración de tipo económico.

## **1.9 Formalización de las tareas y su proyección**

Aprovechar la abundante existencia de datos de proceso, el descubrimiento de relaciones entre sus estadísticas, factores de respuesta y la posibilidad de implementación de nuevos algoritmos de control o mejoramiento de los existentes requieren de nuevas medidas informativas y la formalización de

estructuras que viabilicen su uso constituye el reto a enfrentar en lo que resta del trabajo.

Específicamente, se busca

- Estudiar y obtener un orden de datos desde sistemas SCADA,
- Formulación de posibles formas y relaciones como índices de calidad
- Realización de experimentos que validen la estructura propuesta

Todo ello para

- Proponer un esquema de evaluación de calidad en los accionamientos.

El centro fuente de datos será el hardware que protege y monitorea el accionamiento con sus partes, que se opera a la salida del tanque de licor con entrada a sulfuros.

---

## **CAPÍTULO II METODOLOGÍA DE ANÁLISIS**

---

### **2.1 Introducción**

El hardware del accionamiento sobre el tanque de licor con salida a la planta de sulfuros que constituye nuestro objeto de trabajo, descrito en el capítulo I, contiene interruptores SR469, Controladores Lógicos Programables (PLC o autómatas programables), y la instrumentación de campo a diferentes niveles. Las funciones de automatización, control y manejo de potencia se reparten entre el hardware y el software, permitiendo la aplicación de métodos de ingeniería de control y la recogida y procesamientos de datos e información con diversos tipos de relaciones y patrones.

### **2.2 Control y regulación de la velocidad en motores asincrónicos trifásicos**

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables. En los mismos se requiere un control preciso de la velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes.

**Los principales factores a considerar para el diseño de un sistema de regulación de velocidad son:**

- a) Límites o gama de regulación.
- b) Progresividad o flexibilidad de regulación.
- c) Rentabilidad económica.
- d) Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada.
- e) Sentido de la regulación (aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal).
- f) Carga admisible a las diferentes velocidades.
- g) Tipo de carga (par constante, potencia constante, etcétera).
- h) Condiciones de arranque y frenado.

La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por métodos eléctricos.

Los motores asíncronos son máquinas de velocidad esencialmente constante. Recordemos que la expresión que nos da el valor de la velocidad de un motor asíncrono en RPM es:

$$N = (1 - s) N_s = (1 - s) 60 f / p \quad (2.2.1)$$

Donde  $s$  representa el resbalamiento,  $N_s$  las RPM sincrónicas,  $f$  la frecuencia y  $p$  el número de pares de polos.

**Existen solo dos técnicas para regular la velocidad de un motor de inducción:**

1. Variar el deslizamiento del motor para una carga dada.
2. Variar la velocidad sincrónica (velocidad de los campos magnéticos del rotor y del estator) puesto que la velocidad del rotor siempre permanece cerca de  $n_{sinc}$ .

La velocidad sincrónica de un motor de inducción está dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120 f_e}{P} \quad (2.2.2)$$

Donde  $f_e$  es la frecuencia de línea, y  $P$  el número de polos.

**El control del deslizamiento.**

El control del deslizamiento puede ser llevado a cabo bien sea:

1. Variando la resistencia del rotor.
2. Variando el voltaje en las terminales del motor.

**Las únicas formas en que se puede variar la velocidad sincrónica de la máquina**

Las únicas formas en que se puede variar la velocidad sincrónica de la máquina son:

1. Cambiando el número de polos de la máquina.
2. Cambiando la frecuencia eléctrica. Control de la velocidad mediante relación voltaje/frecuencia.

**Cambio del número de polos.**

Existen dos métodos importantes para cambiar el número de polos en un motor de inducción:

1. El método de polos consecuentes.
2. Devanados de estator múltiples.

### **2.2.1 Cambio de frecuencia**

Este método permite transformar fácilmente un equipo de velocidad fija en un accionamiento de velocidad variable, sin realizar grandes modificaciones. Con este tipo de regulación se puede obtener un amplio control de velocidades, con el máximo par disponible en todas las frecuencias con un elevado rendimiento. Si se prolonga la característica al cuadrante generador se puede obtener un frenado muy eficiente por reducción de frecuencia, con una recuperación de energía hacia la red de alimentación.

En la actualidad la modificación de la frecuencia se realiza fundamentalmente por medio de variadores estáticos electrónicos que ofrecen una regulación suave, permitiendo un aumento en la vida útil de todas las partes involucradas y originando un ahorro en el mantenimiento por ausencia de partes en movimiento que sufran desgastes. Consisten básicamente en un convertidor estático alterna-alterna (cicloconvertidor) ó alterna-continua-alterna (convertidor de enlace), que permiten la modificación progresiva de la frecuencia aplicada, con la consiguiente modificación de la corriente y el par motor. En algunos casos se agregan filtros de armónicas.

En el cicloconvertidor se sintetiza una onda de menor frecuencia a partir de una alimentación polifásica de mayor frecuencia, conectando sucesivamente los terminales del motor a las distintas fases de la alimentación. La onda sintetizada generada es rica en armónicos y en algunos casos el circuito puede generar subarmónicos que podrían llegar a producir problemas si excitasen alguna resonancia mecánica del sistema.

Por otro lado, el cicloconvertidor ofrece una transformación simple de energía de buen rendimiento, permite la inversión del flujo de potencia para la regeneración y la transmisión de la corriente reactiva; proporcionando una gama de frecuencias de trabajo que va desde valores cercanos a cero hasta casi la mitad



de la frecuencia de alimentación, con fácil inversión de fase para invertir el sentido de rotación.

En el convertidor de enlace la alimentación de la red de corriente alterna se rectifica en forma controlada y luego alternativamente se conmutan las fases del motor al positivo y al negativo de la onda rectificada, de manera de crear una onda de alterna de otra frecuencia.

La tensión y frecuencia de salida se controlan por la duración relativa de las conexiones con las distintas polaridades (modulación del ancho de pulso) de manera de conservar constante el cociente tensión / frecuencia para mantener el valor del flujo magnético en el motor.

Aunque la onda de tensión obtenida no es sinusoidal, la onda de corriente tiende a serlo por efecto de las inductancias presentes. Además, de este modo se obtiene una amplia gama de frecuencias por encima y por debajo de la correspondiente al suministro, pero exige dispositivos adicionales c.c. /c.a. para asegurar el flujo de potencia recuperada.

Hay que considerar que las corrientes poli armónicas generan un calentamiento adicional que disminuye el rendimiento y puede llegar a reducir el par (por ejemplo, el 5<sup>to</sup> armónico produce un campo giratorio inverso).

También cabe acotar que la vibración de los motores aumenta cuando se los alimentan con convertidores electrónicos de frecuencia y que la componente de alta frecuencia de la tensión de modo común de los convertidores de frecuencia puede causar un acoplamiento con la tierra a través de la capacidad que se forma en los rodamientos, donde las pistas actúan como armaduras y la capa de grasa como dieléctrico.

Asimismo digamos que los variadores de velocidad generalmente también sirven para arrancar o detener progresivamente el motor, evitando por ejemplo, los dañinos golpes de ariete que pueden aparecer en las cañerías durante la parada de las bombas.

Estos convertidores poseen protecciones contra asimetría, falla de tiristores, sobre temperatura y sobrecarga; además de vigilancia del tiempo de arranque con limitación de la corriente, control de servicio con inversión de marcha,

optimización del factor de potencia a carga parcial, maximización del ahorro de energía durante el proceso.

### 2.2.2 Control de la frecuencia de línea.

Cuando se opera a velocidades inferiores a la velocidad base del motor es necesario reducir el voltaje aplicado a las terminales del estator para obtener una operación adecuada. El voltaje aplicado a las terminales del estator deberá disminuir linealmente con la disminución de la frecuencia en él. Este proceso se llama degradación (derating). Si esto no se hace, se saturará el acero del núcleo del motor de inducción y fluirán corrientes de magnetización excesivas en la maquina.

Para entender eso recuérdese que el flujo en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar aplicando la ley de Faraday:

$$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2.3)$$

Si se aplica un voltaje  $v(t) = V_M \text{sen } \omega t$  al núcleo, el flujo  $\phi$  resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int v(t) dt = \frac{1}{N_p} \int V_M \text{sen } \omega t dt \quad (2.2.4)$$

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_p} \cos \omega t \quad (2.2.5)$$

Nótese que la frecuencia eléctrica aparece en el denominador de esta expresión. Entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en 10%, mientras que la magnitud del voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementa cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización.

**Fig. Curvas par-velocidad para velocidades por debajo de la velocidad base, suponiendo que el voltaje de línea disminuye linealmente con la frecuencia.**

Cuando el voltaje aplicado a un motor de inducción varía linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base, el flujo en el motor permanece aproximadamente constante.

Cuando la frecuencia eléctrica aplicada al motor excede la frecuencia nominal del motor, el voltaje del estator es mantenido constante en valor nominal.

**Fig. Familia de curvas características par-velocidad para velocidades por encima de la velocidad base y voltaje constante.**

El variador de velocidad genera armónicos al sistema por todo lo anteriormente planteado, en primer lugar el variador esta compuesto por un convertidor de frecuencia cuya función es mantener a la salida una frecuencia estable, es decir, la frecuencia que se necesita para el funcionamiento de los motores o la frecuencia que se opera en las plantas. Este método de regular o variar la frecuencia es por lo que el variador origina armónicos al sistema. También la variación de frecuencia se obtiene mediante dos etapas en series; una rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, se le suele llamar a esta segunda etapa ondulatoria. Todo este conjunto de etapas recibe el nombre de inversor.

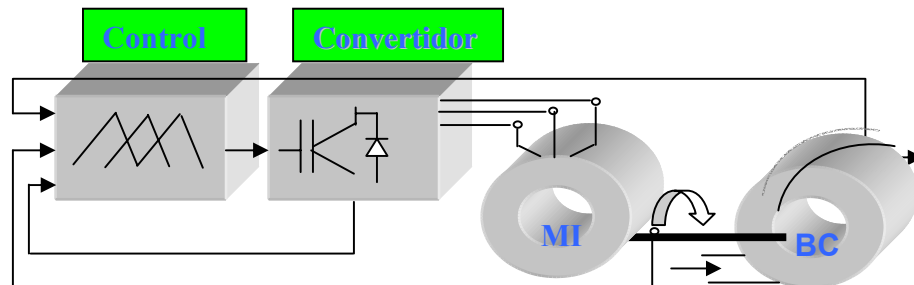


Figura 2.2.1 Diagrama de bloques de un variador de velocidad.

### 2.3 Origen de los armónicos

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo  $\phi$  respecto a la tensión. Para

simplificar se considera que las cargas no lineales se comportan como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red.

Las cargas armónicas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como: variadores de velocidad, rectificadores, convertidores, etc. Otro tipo de cargas tales como: reactancias saturables, equipos de soldadura, hornos de arco, etc., también inyectan armónicos. El resto de las cargas tienen un comportamiento lineal y no generan armónicos inductancias, resistencias y condensadores.

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en *estrella-estrella* con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos. Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia. Para entender esto más fácilmente mencionaremos algunos conceptos previos.

Entre los problemas mas frecuentes que causan los armónicos podemos señalar:

- Interferencias en las telecomunicaciones.
- Distorsión en la tensión de la red.
- Perturbaciones en los sistemas electrónicos informáticos.
- Funcionamiento defectuoso de relés.

- Fallas en transformadores y motores debido al sobrecalentamiento producido por el aumento de las pérdidas en el núcleo electromagnético, por una generación de mayores corrientes parásitas.
- Interrupción en la alimentación debida al disparo de las protecciones.

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan:

- Su amplitud; hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.
- Su orden; hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir  $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$ .

El orden del armónico, también referido como el rango del armónico, es la razón entre la frecuencia de un armónico  $f_n$  y la frecuencia del fundamental (60 Hz).

$$n = \frac{f_n}{f_1} \text{ (Por principio, la fundamental } f_1 \text{ tiene rango 1). (2.3.1)}$$

Cualquier fenómeno periódico puede ser representado por una serie de Fourier:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \delta_n) \quad (2.3.2)$$

donde:

$Y_0$  - Es la componente de corriente directa, la cual es generalmente cero en sistemas eléctricos de distribución.

$Y_n$  - Valor rms de la componente ( $n^{\text{th}}$ ) armónica.

$\varphi_n$  - Angulo de fase de la componente ( $n^{\text{th}}$ ) armónica cuando  $t = 0$ .

Los armónicos por encima del orden 23 son despreciables.

La cantidad de armónicos es generalmente expresada en términos de su valor rms dado que el efecto calorífico depende de este valor de la onda distorsionada.

Para una onda sinusoidal el valor eficaz es el máximo valor dividido por raíz de 2. Para una onda distorsionada, bajo condiciones de estado estable, la energía disipada por el efecto Joule es la suma de las energías disipadas por cada una de las componentes armónicas:

$$RI^2 t = RI_1^2 t + RI_2^2 t + \dots + RI_n^2 t \quad (2.3.3)$$

donde:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 \quad (2.3.4)$$

o también:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2} \quad (2.3.5)$$

### **(suponiendo que la resistencia se tome como una constante)**

Este cálculo permite intuir uno de los principales efectos de los armónicos que es el aumento de la intensidad eficaz que atraviesa una instalación debido a las componentes armónicas que lleva asociada una onda distorsionada.

El porcentaje de armónico y la distorsión total armónica cuantifican la disturbancia armónica que puede existir en una red de suministro eléctrico.

La tasa de armónicos o porcentaje de armónicos, expresa la magnitud de cada armónico con respecto a la fundamental.

La distorsión total armónica (THD), cuantifica el efecto térmico de todos los armónicos. La CIGRE propone la siguiente expresión para el cálculo de esta magnitud:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (2.3.6)$$

donde:

$Y_n$  - magnitud de la armónica n

$Y_1$  - magnitud de la onda de frecuencia fundamental

### **2.3.1 Principales perturbaciones por armónicos de corriente y voltaje**

Son sobrepuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución.

Para detectar los posibles problemas de armónicos que pueden existir en las redes e instalaciones es necesario utilizar equipos de medida de verdadero valor

eficaz, ya que los equipos de valor promedio sólo proporcionan medidas correctas en el caso de que las ondas sean perfectamente sinusoidales. En el caso en que la onda sea distorsionada, las medidas pueden estar hasta un 40 % por debajo del verdadero valor eficaz.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes puramente sinusoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionadas serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Los voltajes no sinusoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos conectados al sistema. Entre estos efectos se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipamiento de potencia así como la degradación de su eficiencia y funcionamiento en general.

Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tipo de carga encontrada, e incluye:

- Efectos instantáneos.
- Efectos a largo plazo debido al calentamiento.

**Efectos instantáneos:** Armónicos de voltajes pueden distorsionar los controles usados en los sistemas electrónicos. Ellos pueden por ejemplo afectar las condiciones de conmutación de los tiristores por el desplazamiento del cruce por cero de la onda de voltaje.

Los armónicos pueden causar errores adicionales en los discos de inducción de los metros contadores. Por ejemplo, el error de un metro clase 2 será incrementado un 0.3 %, en presencia de una onda de tensión y corriente con una tasa del 5 % para el 5<sup>o</sup> armónico.

Las fuerzas electrodinámicas producidas por las corrientes instantáneas asociadas con las corrientes armónicas causan vibraciones y ruido,

especialmente en equipos electromagnéticos (transformadores, reactores, entre otros).

Torques mecánicos pulsantes, debido a campos de armónicos rotatorios pueden producir vibraciones en máquinas rotatorias.

Disturbancias son observadas cuando líneas de comunicación y control son distribuidas a lo largo de líneas de distribución eléctricas que conducen corrientes distorsionadas. Parámetros que deben tenerse en cuenta incluyen: la longitud que se encuentran dichas líneas en paralelo, las distancias entre los dos circuitos y las frecuencias armónicas (el acoplamiento aumenta con la frecuencia).

Los armónicos son causantes de numerosos problemas de operación en los sistemas de protección. Entre ellos esta la operación incorrecta de fusibles, de interruptores (breakers) y equipos o sistemas digitales de protección.

Para el caso de equipos protegidos contra sobrevoltaje cuyos sistemas de protección también estén diseñados para operar con voltajes sinusoidales, estos pueden operar incorrectamente ante la aparición de formas de onda no sinusoidales. Esta operación incorrecta puede ir desde la sobreprotección del equipo hasta la desprotección del mismo por la no operación ante una forma de onda que podría dañarlo de forma severa. El caso típico se presenta ante formas de onda que presentan picos agudos. Si el dispositivo de medición esta diseñado para responder ante valores *rms* de la forma de onda, entonces estos cambios abruptos pudieran pasar sin ser detectados y conllevarían a la desprotección del equipo ante aquellos picos agudos dañinos, que no provoquen un aumento notable de la magnitud medio cuadrática censada. También pudiera ocurrir el caso contrario, el disparo ante valores no dañinos para el equipo protegido. En estos casos el ajuste de la protección deberá depender de las características de la forma de onda: voltajes pico y *rms*, tiempo de crecimiento de la onda, entre otros. Las protecciones convencionales no tienen en cuenta todos estos parámetros y lo que toman como base del proceso de protección, lo hacen sobre la suposición de que la forma de onda es puramente sinusoidal lo



cual puede ser aceptado para algunas formas de onda pero incorrecto para otras que pueden ser dañinas.

**Efectos a largo plazo:** El principal efecto a largo plazo de los armónicos es el calentamiento.

#### Calentamiento de capacitores:

Las pérdidas causadas por calentamiento son debidas a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado para conducción y a la frecuencia para histéresis. Los capacitores son por consiguiente sensibles a sobrecargas, tanto debido a un excesivo voltaje a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones armónicas.

Estas pérdidas son definidas por el ángulo de pérdida ( $\delta$ ) del capacitor cuya tangente es la razón entre las pérdidas y la energía reactiva producida.

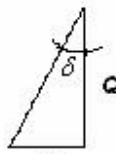

$$\tan \delta = \frac{P}{Q}$$

Figura 2.3.1 Triángulo relacionado con la potencia del capacitor, (potencia activa (P), reactiva (Q), aparente (R)).

Valores de alrededor de  $10^{-4}$  de la fundamental pueden ser citados para  $\tan \delta$  El calor producido puede conducir a un rompimiento dieléctrico.

#### Calentamiento debido a pérdidas adicionales en máquinas y transformadores:

Pérdidas adicionales en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento, y circuito magnético) de máquinas causadas por la diferencia considerable en velocidad entre el campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor.

En los transformadores existirán pérdidas suplementarias debido al efecto pelicular, el cual provoca un incremento de la resistencia del conductor con la

frecuencia, también habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de Eddy o Foucault (en el circuito magnético).

#### Calentamiento de cables y equipos:

Las pérdidas son incrementadas en cables que conducen corrientes armónicas, lo que incrementa la temperatura en los mismos. Las causas de las pérdidas adicionales incluyen:

- Un incremento en la resistencia aparente del conductor con la frecuencia, debido al efecto pelicular.
- Un aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.
- Un incremento de las pérdidas dieléctricas en el aislamiento con la frecuencia, si el cable es sometido a distorsiones de tensión no despreciables.
- El fenómeno relacionado con la proximidad, de envolventes, de pantallas (conductores revestidos) puestas a tierra en ambos extremos, entre otros.

De una forma general todos los equipos (cuadros eléctricos) sometidos a tensiones o atravesados por corrientes armónicas, sufren más pérdidas y deberán ser objeto de una eventual disminución de clase. Por ejemplo, una celda de alimentación de un condensador se dimensiona para una intensidad igual a 1.3 veces la corriente reactiva de compensación. Este sobredimensionamiento no tiene en cuenta sin embargo el aumento del calentamiento debido al efecto pelicular en los conductores.

Muchas de las anomalías que ocasiona la circulación de corrientes de frecuencias que no son propiamente del sistema, a través de él y de los equipos conectados, causando en ocasiones problemas de operación, tanto a la empresa suministradora como al usuario, se deben a las siguientes razones:

1. Las frecuencias del flujo de potencia de tensiones y corrientes sobrepuestas a las ondas de flujo de 50 ó 60 ciclos, originan altas tensiones, esfuerzos en los aislamientos, esfuerzos térmicos e incrementan las pérdidas eléctricas.
2. Muchos aparatos eléctricos son diseñados para aceptar y operar correctamente en potencia de 50 ó 60 ciclos, pero no responden bien a

cantidades significantes de potencia a diferentes frecuencias. Esto puede causar ruido en el equipo eléctrico, problemas mecánicos y en el peor de los casos falla del equipo.

3. Los armónicos generados en un sistema eléctrico pueden crear niveles altos de ruido eléctrico que interfieran con las líneas telefónicas cercanas.
4. La presencia de frecuencias diferentes a la nominal en la tensión y en la corriente, regularmente no son detectables por un monitoreo normal, por mediciones o por el equipo de control; por lo que su presencia no se nota. Por ejemplo los medidores residenciales monofásicos no detectan frecuencias mucho más arriba de 6 ciclos. Frecuentemente la primera indicación de la presencia significativa de armónicos es cuando causan problemas de operación o fallas del equipo.

#### **Aportes de armónicos en el sistema de bombeo automatizado**

Los mayores contaminantes de armónicos en este sistema son los instrumentos de medición, el variador de velocidad y los motores de inducción que accionan las bombas centrífugas.

#### **2.4 Modelo del variador de velocidad - Motor de inducción**

El variador que se utilizara será un convertidor de frecuencia con circuito intermedio (fuente) de tensión que permite variar la velocidad de motores trifásicos. El control lo ejecuta un microprocesador incorporado.

Gracias a un método de modulación por ancho de pulso particular, con frecuencia de pulsos o pulsos ajustables, y opera en los cuatros cuadrantes porque acciona y frena en ambos sentidos.

##### Características:

- > Control por microprocesadores para una alta fiabilidad y confiabilidad.
- > Posibilidad de mando a distancia a través de un puerto (interfases) serie RS232, que usa un protocolo de comunicaciones MODBUS.
- > Posibilidad de controlar hasta 31 convertidores vía protocolo USS.
- > Para uso en cualquier aplicación, los convertidores ofrecen un extenso grupo de parámetros.

- Para memorizar los ajustes de los parámetros, el convertidor incorpora una memoria no volátil.
- Viene preprogramado de fábrica con ajustes prefijados (por defecto) ó estándar por requerimientos Europeos y Norteamericanos.
- La frecuencia de salida (y con ella la velocidad del motor) puede controlarse de cinco formas:
  1. Consigna digital de frecuencia.
  2. Consigna analógica (entrada de tensión o corriente).
  3. Potenciómetro integrado.
  4. Frecuencia fija o prefijada.
  5. Tele transmisión de datos.
- Freno incorporado por inyección de corriente continua.
- Compresión sistemática de carga a FCC (flux current control).
- Generador de rampas incorporado para diferentes tiempos de aceleración y desaceleración.
- Panel para el mando con teclado de membrana.
- Dos reles de salida incorporado.
- Salida análoga incorporada.
- Conector externo para el panel de mando con visualizador para mensajes o para usuario como interfases RS 485 externo.

#### **2.4.1 Medidas a tener en cuenta para realizar mediciones al variador de velocidad**

Deberá utilizarse uno de los tres métodos siguientes, o una combinación de ellos, para comprobar las conexiones: medidas de resistencia, caídas de tensión y medida de temperatura.

#### **Datos del variador**

**Modelo: 500H3P480VF7STD**

**Serie #: 040629030-30**

HP	Corriente(A)	Tensión(V)	S(kVA)	Frecuencia(Hz)
500	575	460	510	60

Tabla 2.4.1 Datos del Variador.

## 2.5 Estudios sobre Armónicos en las redes

En cualquier sistema eléctrico, los armónicos ocasionan distorsión en el voltaje, así como pérdidas adicionales en transformadores, conductores y demás elementos de un sistema eléctrico. El creciente uso de dispositivos de electrónica digital ha hecho que este problema se presente más frecuente. El análisis de flujos armónicos comienza por estudiar las características resonantes del sistema, conociendo la respuesta de la impedancia con un barrido de frecuencia. Este comportamiento de la impedancia revelará el riesgo potencial de que se presente una magnificación de corrientes armónicas al conjuntarse una alta impedancia a una determinada frecuencia y la presencia en el sistema de la armónica correspondiente a esa frecuencia, es decir, al presentarse una resonancia en paralelo.

Esta condición de operación puede presentarse cuando se intenta corregir factor de potencia con la instalación de bancos de capacitores, una vez que estos elementos son de naturaleza capacitiva lo que modifica la frecuencia resonante natural de cualquier sistema.

Un análisis de flujos armónicos, tiene la finalidad de conocer las trayectorias de las corrientes de diferente frecuencia a la fundamental (60 Hz), derivadas de la inyección de corrientes armónicas por la presencia de cargas no-lineales en un sistema eléctrico.

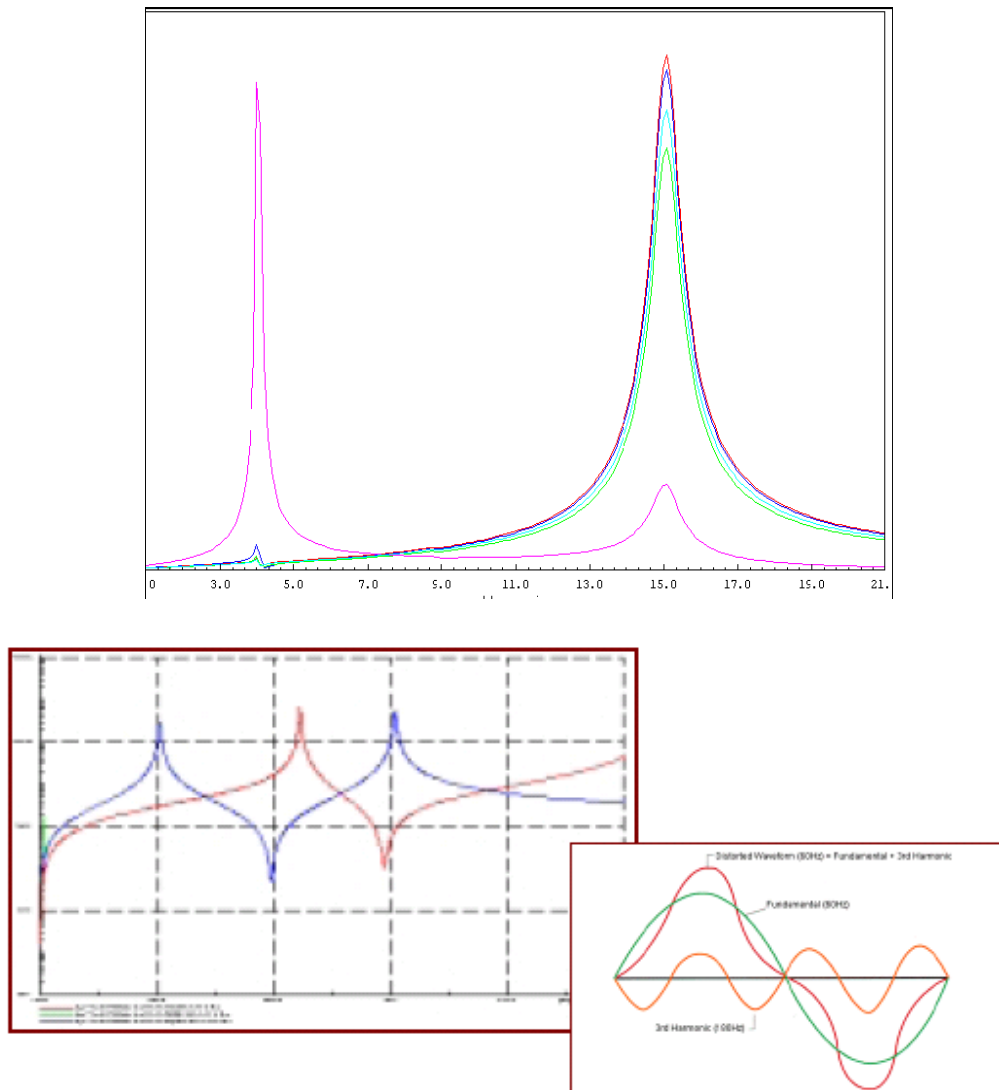


Figura 2.5.1 Flujo de corrientes armónicas.

Estos flujos de corriente armónica pueden llegar a distorsionar la señal de voltaje a tal grado que provocan malfuncionamiento de cargas sensibles, disparos erróneos de los dispositivos de protección, acortamiento de la vida de los elementos del sistema, etc. Al conocer las trayectorias y la magnitud de estas corrientes y el efecto que causan en el voltaje, es posible tomar acciones preventivas o correctivas para evitar efectos degradantes en el sistema, como por ejemplo, la instalación de filtros armónicos, la reubicación de cargas sensibles, etc.

## **2.6 Medición y Monitoreo**

La instrumentación existente alrededor del tanque de licor permite la acción del interruptor Multilin SR469 y la actualización del SCADA – CITECT[ver anexo 2]. Las mismas nos permiten informarnos acerca del estado del accionamiento tanto desde el punto de vista mímico como numérico, no obstante para un estudio se pueden incorporar siguiendo un patrón de muestreo.

- Reportes de modelo térmico
- Reportes de tendencias según cálculos y muestreo

Es posible también con algún esfuerzo adicional de hardware y programación resolver las interrogantes que siguen:

- 1- En qué medida el variador mantiene armónicos.
- 2- Cuál es la eficiencia y su comportamiento (importante para mantenimiento).
- 3- Existen regularidades tipo ciclos tecnológicos (su tiempo de respuesta).
- 4- Cuál es la influencia de los ciclos y el comportamiento de la eficiencia en el control (leyes activas o de respuesta).

Todos los datos anteriores pueden convertirse en Pantallas enriquecidas que aporten información para decisiones de mayor rango que las directas del operador o proyectista.

## **2.7 Extracción y Selección de Fuentes de Información**

El hardware del accionamiento sobre el tanque de licor con salida a la planta de sulfuros que constituye nuestro objeto de trabajo, descrito en el capítulo I, contiene interruptores SR469, Controladores Lógicos Programables (PLC o autómatas programables), y la instrumentación de campo a diferentes niveles.

Las funciones de automatización, control y manejo de potencia se reparten entre el hardware y el software, permitiendo la aplicación de métodos de ingeniería de

control y la recogida y procesamientos de datos e información con diversos tipos de relaciones y patrones.

En la planta de sulfuros, no existen hasta el ahora lazos cerrados pero con el objetivo de mejorar el control además de la eficiencia y las condiciones de trabajo, se monto en fase de prueba en la pizarra de 480V, un variador de velocidad para la bomba de licor PU-3.

El variador de velocidad es el accionador principal en la planta de sulfuros porque se mantener el nivel del tanque, a medida que el nivel del tanque se eleva. Entre sus características, es de 480V, mientras que el motor de la bomba de licor pertenece a la pizarra de 5kV (4.16kV), [ver anexo 2(4)] par lograr la conexión fue necesario instalar un transformador de 0.48/4.16kV[ver anexo1 (1 y 2 vista)]. El sistema se protegió mediante el relé electrónico SR-469, el cual censa por la parte de alta y mandará a abrir el circuito por la parte de baja ante cualquier falla detectada.

El conjunto de automatización actual permite, vía información, la implementación de algoritmos para mantener y darle seguimiento al rendimiento del accionamiento en cualquier estado de carga mecánica del sistema, incluyendo medianas potencias. En [Rojas. L, 2006] se propone un algoritmo difuso, esencialmente el control se efectúa con la mediciones de la potencia de entrada  $P_e$  (su valor de línea o desde la salida del rectificador), y entonces uno o más parámetros son variados desde el ajuste del AVA con radio constante del voltaje frecuencia (V/Hz), con bajos voltajes en proporción con bajas velocidades (rpm); nuestra apreciación esta en realizar lo mismo pero con el arreglo de atender mediante el algoritmo, las oscilaciones que aparecen desde la carga mecánica rotacional que ocasionan cambios a veces no cíclicos en el comportamiento de la maquina.

Los rasgos más importantes que la presencia de realimentación impone a un sistema son:

- Aumento de la exactitud. Por ejemplo, la habilidad para reproducir la entrada fielmente.



- Reducción de la sensibilidad de la salida, correspondiente a una determinada entrada, ante variaciones en las características del sistema.
- Efectos reducidos de la no linealidad y de la distorsión.
- Aumento del intervalo de frecuencias (de la entrada) en el cual el sistema responde satisfactoriamente (aumento del ancho de banda )
- Tendencia a la oscilación o a la inestabilidad.

Los reguladores son controladores que buscan mantener el valor de la salida en un punto dentro del entorno de un error prefijado.

### **2.7.1 Mejoramiento de la eficiencia desde esquema de control**

El rendimiento de los accionamientos de motores eléctricos ha estado enmarcado en función del estudio de las pérdidas en relación con la potencia de entrada del sistema, la velocidad, el troqué, el flujo en el entrehierro, la corriente de estator, el factor de potencia y el cálculo por diferentes métodos del rendimiento del motor. [Hsu y otros, 1998] [Slaets, van Roy y Belmans, 2000].

Usualmente en los accionamiento eléctricos, los motores operan manteniendo el flujo en sus valores nominales o con radio de voltaje / frecuencia (V/Hz) sostenidamente constante para las condiciones de cargas de diseño, mereciendo un favorable trabajo con repuestas rápidas ante los transitorios del sistema. Pero cuando el accionamiento pasa a trabajar con cargas mas bajas o ligeras, estas aproximaciones causan perdidas en el núcleo o perdidas en el cobre de la maquina, comportándose en condiciones de rendimientos mucho menores.

Varios esquemas de control de motores eléctricos a lazo abierto y cerrado son implementados basándose en:

- a) Control del deslizamiento del motor
- b) Control del voltaje o corriente mediante una fuente inversora
- c) Control combinado de voltaje y frecuencia
- d) Control vectorial
- e) Control de la perturbación de la velocidad del rotor
- f) Minimización de la potencia de entrada para el máximo rendimiento

## 2.7.2 Fundamentos tecnológicos de la regulación electrónica de velocidad en motores

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

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

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

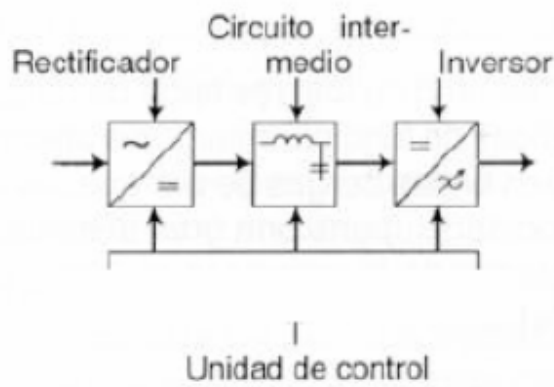


Figura 2.7.1 Convertidor de frecuencia.

El modo de trabajo puede ser manual o automático, según las necesidades del proceso, permitiendo hallar soluciones para obtener puntos de trabajo óptimos en todo tipo de procesos, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual.

Se incluyen dentro del propio convertidor protecciones para el motor, contra sobreintensidad, sobretensión, fallas contra desequilibrios, defectos a tierra, etc.

**Control automático de velocidad.** Utilizando realimentación se puede ajustar la velocidad automáticamente. Esta solución es la ideal para su instalación en aplicaciones en las que la velocidad demandada varía de forma continua.

Rectificadores controlados de tensión variable.

El puente trifásico de onda completa o de Graetz es el más empleado desde el punto de vista industrial, ya que tiene las siguientes ventajas:

1. Cargamos simétricamente línea trifásica.
2. Se absorben menos armónicos de intensidad en la línea trifásica.
3. La tensión continua es de rizado con menor amplitud y por tanto los filtros para alisado son menores.
4. Las prestaciones dinámicas son mayores, ya que con seis pulsos se puede variar el ángulo de encendido seis veces por periodo.

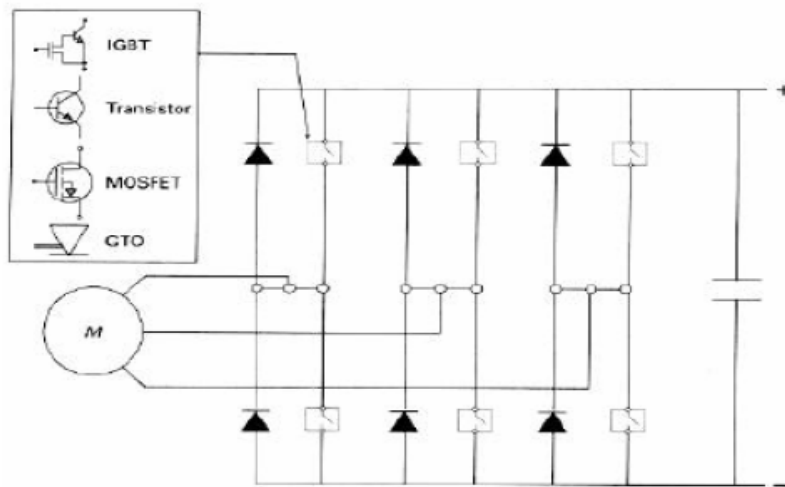
#### **El Circuito Intermedio.**

La función del circuito intermedio es alimentar la tercera etapa, es decir al ondulator, y esto puede hacerlo funcionando como fuente de tensión, en cuyo caso se colocaría un condensador electrostático entre los terminales (+) y (-) para mantener constante la tensión y daría lugar a un inversor con circuito intermedio de tensión. Cuando el circuito intermedio funciona como fuente de intensidad para el ondulator, se pone una inductancia en serie con una de sus ramas, su función es mantener constante la intensidad, y estaríamos hablando de un inversor con circuito intermedio de intensidad.

Según la configuración que se adopte las características del inversor son distintas y condiciona cuestiones tales como: armónicos, resistencia de frenado, gama de potencias, accionamiento para un solo motor o varios a la vez, etc.

#### **Ondulador.**

El ondulator es un conmutador electrónico que comunica alternativamente la tensión o intensidad continua del circuito intermedio sobre las fases del motor de CA conectado a sus salidas. La disposición más común es el puente trifásico de Graetz y está formado por semiconductores controlados sean tiristores, GTO, IGBT o MOSFET. De los anteriores el que más se está utilizando para motores



IGBT.

Figura 2.7.2 Inversor

En función del sistema de conmutación lograremos que las ondas de tensión a la salida hagan que las corrientes absorbidas se acerquen al sistema trifásico senoidal.

Hay distintas formas de regular la tensión de salida del inversor:

- ✓ Variar el valor de la tensión en el circuito intermedio.
- ✓ Variar la tensión de salida en función de la proporción entre los tiempos de conexión y desconexión de los semiconductores de potencia mediante la técnica de regulación PWM (iniciales de **M**odulación del **A**ncho de **P**ulso, en inglés). Además de regular la salida, este método tiene la ventaja de generar una onda de tensión de salida que mejora notablemente la onda de intensidad absorbida por el motor, lo cual hace que el motor funcione como si estuviera alimentado por tensiones senoidales de la red.

### 2.7.3 Funcionamiento del motor asíncrono alimentado por convertidores de frecuencia

Los inversores con circuito intermedio de tensión son los más usados en aplicaciones prácticas. Un inversor se elige en función de parámetros tales como:

- ✓ Accionar a un solo motor o varios.
- ✓ Banda necesaria de regulación y su precisión.

- ✓. Consecuencias sobre la red eléctrica del convertidor adoptado.
- ✓. ¿Tiene sentido económico prever un retorno de energía? (Frenado regenerativo).
- ✓. Velocidad de respuesta para adaptarse a los cambios de consigna.

#### **2.7.4 Estrategias de Control en Accionamientos**

Control escalar:

- Control tensión – frecuencia (U/f)
- Control de la corriente del estator de la frecuencia del deslizamiento (o simplemente del deslizamiento).

Control Vectorial:

- Control por Campo Orientado (FOC).
  - Método indirecto.
  - Método directo.
- Control sin sensores.
- Control directo del torque.

La principal diferencia con los otros métodos de control anteriores es que el DTC no existe un modulador PWM separado, sino que la posición de los interruptores del convertidor de potencia es determinada directamente por el estado electromagnético del motor. Para ello es necesario disponer de un modelo muy exacto del motor junto con una elevadísima capacidad de cálculo.

#### **2.8 Observaciones y Sugerencias Metodológicas**

El sistema de información visto no contiene formas directas de medir calidad de la energía, ni índices de adaptación u optimización de trabajo o distribución de carga según el trabajo del variador y el concepto de metalazo de control.

Para lograr tener criterios sobre el contenido armónico se puede utilizar como equipamiento el denominado PQM, existente como recurso en la planta pero para completar su estudio debe integrarse al sistema con CITECT, lo cual es inexistente y no se cuenta con la metodología adecuada para esta integración, ni con un plan de experimentos. Todo lo anterior tiene sugerencias y sustentos en la continuación de este trabajo.

## **CAPÍTULO III**

### **PROPUESTAS EVALUADORAS Y EXPERIMENTACIÓN CON VARIANTES**

---

#### **3.1 Introducción**

Los aspectos relacionados en el capítulo II permiten establecer una vía metodológica de evaluación de eficiencia en accionamientos eléctricos que incluyan control por frecuencia variable y su relación con la calidad de la energía asociada con las transformaciones inherentes a estos procesos.

Se abre la posibilidad de incorporar recursos para tabular, calcular, interpolar, y extrapolar índices de carga, de modulación, gasto energético, calidad de la energía y el control en un accionamiento eléctrico automatizado tipificado para entornos industriales. La elaboración de perfiles permitiría la configuración, mantenimiento e integración adaptada o inteligente de accionamientos, la conformación de flujos energéticos y su especificación en diferentes ambientes, así como la implementación de formas cooperativas entre lazos de control en plantas con mira local o global como forma básica de balanceo de cargas de trabajo.

Se toma como portador de factibilidad la existencia de estructuras informativas con impacto operativo.

##### **3.1.1 Árbol de Perfiles**

La elaboración de perfiles corresponde a las correspondencias que puedan establecerse.

Eficiencia Local – Índices PWM – Índices de Calidad

Índices PWM – Índices Distorsión Armónica Índices de Calidad – Perfil de Carga  
– Eficiencia Global

Estos perfiles se evalúan para los casos aislado y coordinado de los lazos o las plantas.

En la planta de sulfuros, no existen hasta el ahora lazos cerrados pero con el objetivo de mejorar el control además de la eficiencia y las condiciones de

trabajo, se monto en fase de prueba en la pizarra de 480V, un variador de velocidad para la bomba de licor PU-3.

### 3.2 Eficiencia en el accionamiento

Para valorar la eficiencia en el accionamiento eléctrico se valoraría primero cada elemento del sistema.

El sistema lo constituye un accionamiento de motor de inducción que acciona una bomba centrífuga encargada de transportar licor y como elemento fundamental un variador de velocidad que regula la velocidad del mismo, a este variador se le acopla un transformador elevador para elevar el voltaje a la entrada del motor.

#### 3.2.1 Eficiencia en las bombas centrífugas

La eficiencia en las bombas centrífugas es la razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada en le eje de la máquina. La diferencia entre las dos constituye las pérdidas de potencia dentro de la bomba. Estas pérdidas están agrupadas dentro de tres tipos: hidráulica, mecánica y volumétrica.

##### Eficiencia hidráulica

La altura de presión o carga requerida por el impelente o rodete de trabajo para transferir un volumen determinado de flujo está dado como:

$$H_t = H + h \quad (3.2.1)$$

donde:

H – es la altura de presión actual, [m]

Entonces las pérdidas hidráulicas en la máquina son tomadas en cuenta en la eficiencia hidráulica como:

$$\eta_h = \frac{H}{H + h} \quad (3.2.2)$$

$$\eta_h = \frac{H_t - h}{H_t} = 1 - \frac{h}{H_t} \quad (3.2.3)$$

Esta eficiencia se ve afectada por la configuración del flujo que pasa por la turbo – máquina, determinada usualmente por las imperfecciones de diseño y las rugosidades de la superficie del cuerpo del impelente, lo cual define la suavidad del flujo en el área, y este va correr a través del difusor en su mejor operación.

##### Eficiencia mecánica

La potencia generada en la entrada de la bomba centrífuga, en los alabes del impelente puede ser calculada por la expresión:

$$N_i = (Q + \Delta Q).g.(H + h) \quad (3.2.4)$$

la potencia de salida es la que se desarrolla a la salida de la turbo – maquina y se puede determinar por medio de la expresión:

$$N_s = Q.g.H \quad (3.2.5)$$

##### Eficiencia volumétrica

Se determina por la formula.

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + \Delta Q} = 1 - \frac{1}{\Delta Q} \quad (3.2.6)$$

### Eficiencia en los motores de inducción

La eficiencia en estos motores esta dada por la relación entre la potencia de salida  $P_s$  ó potencia mecánica en su árbol y la relación entre la potencia de entrada ó eléctrica  $P_e$ , que puede ser tomada en los terminales del estator o desde el eslabón de corriente directa del inversor sinusoidal de tensión (VSI a PWM).

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \quad (3.2.7)$$

Usualmente para este cálculo se toman en formato rms ó muestreadas digitalmente:

- Velocidad de rotación
- Corriente por un transductor
- Tensión
- Potencia de entrada
- Resistencia del devanado del estator
- Temperatura del devanado
- Torque en el árbol del motor

Varios autores han desarrollado algunos métodos de cómo determinar la eficiencia, entre los más usados está:

- **Método de los valores nominales**, consiste en el cálculo mediante:

$$\eta = \frac{P_s}{P_{nom}} = \frac{P_{med}}{\sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi} \quad (3.2.8)$$

donde:

$P_{nom}$  - es la potencia nominal de chapa del motor, [kW]

$P_{med}$  - es el valor de la potencia medida en rms, [kW]

$U_{nom}$  - es el valor de la tensión nominal de chapa del motor, [V]

$I_{nom}$  - es el valor de la corriente nominal de chapa del motor, [A]

- **Método del deslizamiento**, consiste en determinar la potencia de salida por:

$$P_s = \frac{S_{med}}{S_{nom}} * P_{snom} \quad (3.2.9)$$

donde:

$S_{med}$ ,  $S_{nom}$  - es el deslizamiento medido y nominal del motor, [%]

$P_{snom}$  - es la potencia de salida nominal del motor, [kW]

- **Método de la corriente**, se realiza calculando la potencia de salida con la medición de la corriente medida y la marcha al vacío:

$$P_s = \frac{I_{med}}{I_{nom}} * P_{snom} \quad (3.2.10)$$

$$P_s = \frac{(I_{med} - I_{mv})}{(I_{nom} - I_{mv})} * P_{snom} \quad (3.2.11)$$

donde:

$I_{med}$  - es la corriente medida en rms, [A]



$I_{mv}$  – es la corriente de marcha al vacío en rms, [A]

- **Método estadístico**, basado en archivar el recorrido histórico de las pérdidas en el motor, considerando por ejemplo un porcentaje de aquellas pérdidas que habitualmente no pueden ser calculadas. Para un grupo de motores típicos se calcula la eficiencia como:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta p}{P_e} \quad (3.2.12)$$

- **Método del circuito equivalente**, tiene en cuenta el cálculo partiendo de las componentes del circuito eléctrico equivalente del motor de inducción, tomando los valores de las resistencias, reactancias e inductancias a una determinada temperatura de trabajo de la máquina.

$$\Delta p_{totales} = I^2 \cdot R \quad (3.2.13)$$

- **Método de las pérdidas incluidas**, tienen en cuenta todo tipo de pérdidas, ya sea de origen electromagnético como mecánico.

- **Método del torque o momento de carga**, es uno de lo más difundido porque relaciona tanto la potencia electromagnética, el número de revoluciones y las pérdidas totales:

$$\eta = \frac{\left[ \left( M_{em} \cdot \frac{2\pi \cdot n_r}{60} \right) - \Delta p_{friccion} - \Delta p_{carga} \right]}{P_e} \quad (3.2.14)$$

donde:

$n_r$  – numero de revoluciones del motor, [rpm]

$\Delta p_{friccion}$  - son las perdidas por fricción en el motor eléctrico, [W]

$\Delta p_{carga}$  - son las perdidas producto de la carga, [W]

### 3.3 Premisas estructurales

Con las variables actuales se puede describir y determinar:

1. Parámetros que se miden sobre el accionamiento en cada parte, i.e, mecánica, eléctrico, control.
2. Cálculo de la eficiencia
3. Variabilidad de los puntos de consigna, e.g, intervalo de frecuencia, márgenes de flujo y consumo, partes involucradas (variador, plc, control, pwm, convertidor, otros motores)

Luego, se puede responder como se reflejan los datos sobre el accionamiento en el SCADA activo.

1. Memoria (tiempo de cálculo, de respuesta, de almacenamiento)

2. Muestras de parámetros (tiempo de medición, variables directas e indirectas que participan en la eficiencia)

3. Cumplimiento de tareas y su secuencias

Tenemos que, en lo fundamental los parámetros para calcular o seguir a la eficiencia, constituyen las bases de nuestras afirmaciones teóricas.

- De Alimentación
- Tiempo en que se toman las mediciones
- Variador
- Criterio de estimación y las tendencias

De ellos se derivan:

- Las posibles curvas de eficiencia
- Parámetros de Calidad y los puntos de referencia para optimización

Las acciones las verificaremos tomando de los interruptores de control y protección y se propondrán acciones de gestión distribuidas en:

- Acciones básicas redistribuidas de campo, que realizan las funciones de control y protección, medición y operaciones locales o maniobras.
- Formar núcleo estructural para cálculo y comunicación con capacidad informativa.
- Funciones de Protección.
- Lectura, Registro y Almacenamiento de mediciones, eventos y oscilografía de datos.
- Operaciones de Apertura y Cierre del equipamiento de conmutación.
- Realización de funciones de control secuencial y de chequeo de sincronismo
- Desactivación de carreras eléctricas o bloqueos de relés.
- Transferencia y Comunicación de datos y funciones al nivel 2 y al sistema SCADA., alarma y sincronización.

Los módulos reciben entradas para medición y monitorización y ejecutan algoritmos de control programados, así como generan las salidas que operan los dispositivos de conmutación, señalización e intercierres.

Otras funciones:

Control: Compensación capacitiva, intercierres.

Medición: Corriente, Tensiones, Potencia, Factor de Potencia, Frecuencia.

Monitoreo: Interruptores, Eventos, Carreras (trips).

Análisis: Carga, Tiempo, Tendencia.

### 3.3.1 Propuesta de Estructura

La estructura se ordena para tener

- ✓ Relaciones con parámetros de tres plantas.
- ✓ Una pantalla según alarmas, grupos de alarmas e intervalos de muestreo y cálculo de seguimiento de la eficiencia, determina los índices de monitoreo.
- ✓ Algoritmos de cálculo, en fórmulas llamadas para alimentar la pantalla y se nutre de los puntos de consigna y las relaciones de segundo orden.
- ✓ Índice de metalazo y su algoritmo de dependencias (tendencias).
- ✓ Capacidad informativa.
- ✓ Derivaciones desde el accionamiento, fundamentalmente el índice de modulación como secuencia, los arranques y paradas en periodo que marquen diferenciales altos y amenazas al control térmico desde el relé de protección.
- ✓ Recursos para trazas secuenciales de mantenimiento o experimentación.

La creación de esta nueva estructura se basa en la existencia de varias premisas:

Ya existen criterios sobre muestreo

Existe variedad contextual (control, perturbación, demanda)

El sistema SCADA – CITECT contiene un reflejo comprimido para indagar sobre velocidad de respuesta, magnitud de impacto y velocidad de reflejo

Existen protocolos preliminares

Existen normas para interpretación de control y energía

Se cuenta con “espacios” para la incorporación algorítmica (sobre cálculos de estados, secuencias y regímenes) de criterios, cálculo de índices y leyes de perturbación

### **3.3.1 Estructura**

Debe permitir en forma de reporte, mezclar la presentación de datos y la adición de cálculos de parámetros que definen relaciones no operacionales directas, es

decir, la eficiencia del accionamiento, la distribución de la variación de velocidad, y las tendencias sobre factores tecnológicos locales y secuenciales. Todo ello tendrá representación para periodos de muestro variable para su estudio comparativo, pero debe constituir un Archivo y Representación solicitable y exportable CITECT que contiene.

Componente	Funciones, Objetivo
Datos de Protección	Tiempo, Ponderación, Relación con la Eficiencia (conexión de cálculo habilitada)
Tabla de Activos	Relaciones lógica y funcional completas Cálculos y Proceso sobre Eficiencia
Indicadores de Apertura / Cierre	Simultaneidades y conectivo a función externa (distribución de velocidades)
Secuencias funcionales de control	Modulación, Ahorro y Calidad de la Energía en intervalos o por tendencia
Funciones de Chequeo de Sincronismo	Vínculos Interplantas Vínculos Intraniveles de Automatización
Desactivación de Carreras Eléctricas	Ponderación de Incidencias de los bloqueos de Relé y Cantidad de Reinicialaizaciones
Transferencias SCADA e Inteligencia	Estados Sistémicos, Conexión Intercontrol y Canales de Información
Registro, Alarma	Registros Compartidos y Sincronización
Compensación	Variación de Energía Reactiva y Estacionareidad

### 3.3.2 Facilidades a partir de esta estructura

Mediciones funcionales. Experimentos informativos.

Propuesta de interacción con SCADA. Formulación de criterios

Información derivada. Inferencia tendencial. Interacciones y Eficiencia

Costos y Cantidad de Información. Acciones derivadas.

Características de velocidad, eficiencia y de control

#### Aplicación de la Estructura

Para el Tanque de Licor sería

Sobrecorrientes y Medidas de Demanda
Intervalo de Frecuencias de operación
Relación Flujo, Altura y tiempo activo de bombas
Acciones respuesta a Corridas y Bloqueos
Nivel de tanque y tiempo de flujo a frecuencia fija
Bloqueos por periodo
Relación comparativa Nivel vs Diapasón de frecuencias de operación
Últimas Alarmas y Eventos Registrados en Intervalo
Cálculos de Valores de Compensación, Parámetros de Filtrado y Eficiencia

### **Funciones de Control**

En el desarrollo de algoritmos es natural que las operaciones se cataloguen por su naturaleza y por el número de estados que involucran, luego a partir de esto se plantean la elaboración de secuencias, y se maneja su realizabilidad a partir de la necesidad de su completamiento y luego se decide el hardware que la procesa, su interrumpibilidad y su comunicabilidad como funciones de control interna o compartida y se define su estructura espacial y temporal.

El accionamiento en el tanque de licor establece la existencia de:

- 2 Tensiones de alimentación con sus pizarras respectivas
- Un transformador
- 2 Interruptores
- 1 Variador
- 1 Tanque
- 1 Punto de consigna
- 4 Bombas
- 4 Motores que accionan gobernados por un variador

La eficiencia del accionar sobre esta instalación vista desde la planta de sulfuros [ver anexo 2(3)] se refleja en la interfase CITECT.

Por simple inspección, las variables bajo observación tienen:

- Velocidad

- % de trabajo del variador
- Caudal / Flujo
- Temperatura
- Corriente
- Corriente Nominal
- Parámetros AutoClave: Licor, Vapor, H<sub>2</sub>S

Se necesita establecer tiempos comunes, composición de acciones, secuencias y reflejo en registros.

La coordinación para estas tareas apoyadas en la base de datos de CITECT, la utilización de estimadores permite detectar para el control:

- arranques, duración de tendencias, cantidades regulares de acciones
- alarmas con demora y por clase
- comportamiento térmico
- magnitudes con correlación
- exactitud y tolerancia de las consignas
- cantidad simultánea de alarmas
- tendencias simples y sincrónicas
- acciones parametrizadas de control simples o secuencias

La propuesta anterior se ha planteado de forma densa pero se piensa en un modo progresivo para su implementación.

### **Funciones a añadir como agregado o independientes**

#### **Operaciones e entrecierres**

- El nombre que identifica la operación
- Condiciones de Operación, Fallas, Éxito
- Tiempo de Sostén, Activación, Falla

#### **Estado de Entradas y Salidas**

- Entradas lógicas,
- Funciones lógicas de temporización
- Contactos físicos para las salidas lógicas
- La cantidad de entradas y salidas disponibles

#### **Herramientas de análisis.**

- Diagramas de barra
- Accesos a información:
  - o Estado, Mediciones, Alarmas, Eventos, Oscilografía
- Cálculos y muestra de componentes simétricas.
- Configuración de macro operaciones e intercierres multizona

### **Funciones de protección relacionados con control**

Intentos de recierre

Retardo programado

Implementación de ventanas de aplicación para funciones especiales y arreglos de funciones, por ejemplo limitación de cantidad de operaciones luego de una condición, distinción de orden de operación.

Imposición lógica y encadenamiento de estados y chequeo de sincronismo

Cierre escalonado de interruptores

Recierre automático de interruptor luego de una carrera de rele (trip)

Deslizamiento de frecuencia

#### Para qué debe servir la estructura informativa:

1. Carácter predictivo y muestral de seguimiento (based on ARMA process, ...)
2. Aporte de conocimiento para decisiones y computabilidad de análisis según interacciones con el proceso (masa, energía y cruces), descomposición de varianza sobre tiempo para ayuda en el diagnóstico de interacciones (propósito control)
3. Base de método de evaluación de rendimiento
  - a. Conocimiento extensivo a priori.
  - b. Modelos empíricos para analizar la estructura predictiva de los datos.
4. Describir objetos individuales:
  - a. accionamiento, carga, alimentación, variador, algoritmo, parámetros medidos, secuencias/tendencias seguidas y estimadas, cálculo de eficiencia, parámetros de control, parámetros de calidad.
5. Cubrir las siguientes tareas:

- a. interfaz (pasiva, actual), muestreo, seguimiento y reflejo en memoria (correspondencia con el cálculo), cuantificación, latencia y exportación de datos.
- b. eficiencia, control, seguimiento, frecuencia de cálculo, de variación, de control.

### 3.4 Simulación como herramientas para elaborar perfiles de eficiencia

El paso final sería Algoritmización de transferencia, seguimiento de índices y eficiencia (generadores de datos – información y sus características), sin embargo podemos escalar varios pasos para construir un modelo coordinado de evaluación de calidad de la energía y enlazar luego otros parámetros.

#### Simulación y Construcción del PWM

Usando la librería Sim Power Systems del Matlab.

Agregar Puente Universal con parámetros como:

Power electronic device	IGBT/Diodes
<b>Snubber</b>	
<b>Rs</b>	1e5
<b>Cs</b>	inf
<b>Ron</b>	1e-3
<b>Forward voltages</b>	
<b>Vf</b>	0 V
<b>Vfd</b>	0 V
<b>Tail</b>	
<b>Tf</b>	1e-6 s
<b>Tt</b>	1e-6 s

- a) Note que el circuito snubber es enteramente la caja de diálogo del puente universal (Universal Bridge). Como el valor del capacitor Cs del snubber es Inf (corto circuitos), es puramente resistivo. Generalmente,



los puentes IGBT no usan snubbers; sin embargo, debido a que cada elemento en Sim PowerS ystems está modelado como fuente de corriente, se tiene que suministrar vías paralelas sobre cada IGBT para permitir la conexión a circuitos inductivos (estator de máquinas asincrónicas). La alta resistencia del snubber no afecta el rendimiento del circuito..

- b) Con la librería Machines copie la [Asynchronous Machine](#) SI Units block, así como la [Machine Measurement Demux](#).
- c) Parametrice la Asynchronous Machine. Active por ejemplo Potencia Nominal a  $3 \cdot 746$  VA y el voltage nominal line-to-line  $V_n$  a 220 Vrms para implementer una máquina de 3 HP, 60 Hz con dos pares de polos. Su velocidad nominal es por tanto ligeramente más baja que la velocidad sincrónica de 1800 rpm, o  $\omega_s = 188.5$  rad/s.
- d) Note que los tres terminals del rotor a, b, y c son accesibles ahora. Durante la operación del motor deben cortocircuitarse juntos. Aunque puede usarse el rotor tipo Jaula de Ardilla, luego de este cambio ya se eliminará el acceso.
- e) Abra el menu bloque Demux block. Cuando se conecte a la salida de medición de la máquina permite acceder a señales internas. Primero selecciones maquinas asincrónicas y mantengase con las señales abc (corrientes del estator), velocidad del rotor  $\omega_m$ , y el torque electromágnetico  $T_e$ .

**Excitación y Carga del Motor** (Se implementa las características velocidad – torque)

**Controlando el Puente Inversor con un Generador de Pulsos**

El generador de pulsos está disponible en la librería de extras de **powerlib**:

Abrir la librería de bloques de control Extras/Discrete Control blocks y copiar el Discrete 3-Phase PWM Generator block. Este bloque se usa para puentes de dos niveles y tres niveles. El convertidor opera en lazo abierto y las señales de modulación PWM son generadas internamente. Conecte la salida P1 a la entrada de pulsos del Puente universal

Abrir la caja de diálogos del bloque Discrete Three-Phase PWM Generator block y activar los parámetros como sigue.

<b>Type (Tipo)</b>	2 level
<b>Mode of operation (Modo de operación)</b>	Un-synchronized
<b>Carrier frequency (frecuencia portadora)</b>	18*60Hz (1080 Hz)
<b>Internal generation of modulating signals (generación interna de señales de modulación)</b>	selected
<b>Modulation index m (Índice de modulación m)</b>	0.9
<b>Output voltage frequency (Frecuencia de la tensión de salida)</b>	60 Hz
<b>Output voltage phase</b>	0 degrees
<b>Sample time</b>	10e-6 s

Use el menú **Edit --> Look Under Mask** del modelo para apreciar como está implementado el PWM. Este sistema de control está hecho enteramente con bloques Simulink. El bloque ha sido discretizado de modo que los pulsos cambien a múltiplos del tiempo de paso especificado. Un tiempo de paso de 10  $\mu$ s corresponde a +/- 0.54% del periodo de conmutación a 1080 Hz.

## Muestra de Señales y Medición de la Corriente y Tensión Fundamentales

Adicionar los bloques de medición de la componente fundamental (60 Hz) empotrado en el voltaje rebanado chopped Vab y la corriente de la fase A. Agregue el bloque Fourier de la librería Extras/Discrete Measurements de **powerlib**

. Con la caja de diálogos del bloque discreto Fourier block chequee que los parámetros son como sigue:

<b>Fundamental frequency f1</b>	60 Hz
<b>Harmonic number</b>	1
<b>Initial input</b>	[0 0]
<b>Sample time</b>	10e-6 s

Conecte el bloque a la salida del sensor de tensión Vab.

Duplique el bloque Discrete Fourier block. Par medir la corriente de la fase A, seleccione el primer elemento de la salida es abc del bloque ASM Measurement Demux block.

Copie un bloque Selector desde la librería Signals & Systems de Simulink.

Abrir su menu y active el **Elemento** a 1. Conecte la salida del Selector al Segundo bloque Discrete Fourier block y su entrada a la salida es abc del bloque Machines Measurement Demux block

Por ultimo, agregue scopes al modelo. Copie el bloque Scope en su circuito. Este scope se usa para mostrar las tensiones, corrientes, velocidad y torque electromagnético instantáneos del motor. Active los siguientes parámetros en el menú **Scope Properties --> General** del bloque scope.

<b>Number of axes</b> <b>(Número de ejes)</b>	4
<b>Time range</b> <b>(Rango de tiempo)</b>	0.05 s
<b>Tick labels</b> <b>(Etiquetas Tick)</b>	bottom axis only

Conecte las cuatro entradas y las cuatro etiquetas a las líneas de conexión, se activarán al comenzar la simulación.

Para permitir nuevos procesamientos de las señales mostradas en el osciloscopio, se tiene que almacenar en una variable. En el menu **Scope Parameters/Data history** del scope, active los siguientes parámetros:

<b>Limit data point to last</b> <b>(Punto limite de datos al ultimo)</b>	deselected
<b>Save data to workspace</b> <b>(salvar datos al espacio de trabajo)</b>	selected
<b>variable name</b> <b>(Nombre de variable)</b>	ASM
<b>Format</b> <b>(Formato)</b>	Structure with time

Luego de la simulación, las cuatro señales mostradas en el scope estarán disponibles en un arreglo de estructura llamada ASM.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

### **Conclusiones**

Las tareas desarrolladas permitieron reconocer

- a) La posibilidad y necesidad de mejorar la utilización de los datos alrededor del control de velocidad por medio de variadores de frecuencia.
- b) La insuficiencia para canalizar información efectiva de las estructuras de presentación y análisis de datos en el SCADA para los accionamientos y dispositivos de control relacionados con el tanque de licor para sulfuros en la empresa Moa Nickel S.A. "Pedro Soto Alba"

Y a partir de ellas se logró:

1. Una propuesta de estructura que relaciona niveles, dispositivos y procesos concurrentes sobre la transferencia de licor para sulfuros
2. Establecer nexos primitivos entre la programación interna del variador (modulación) y las transferencias paramétricas de datos interprocesos adyacentes
3. Se compiló en el informe datos y funciones para evaluar mediante simulación la contaminación armónica, luego la calidad de la energía, todo junto al análisis de tendencias de variables eléctricas y no eléctricas.
4. Se estableció un principio para nuclear criterios sobre formalización de funciones para evaluar la calidad del control y la energía mediante índices a partir del desempeño de sistemas que usan variadores de frecuencia
5. Se cumplieron las tareas descriptivas, de análisis de datos y experimentos de muestreo que involucran un variador de velocidad por variación de frecuencia, comprobándose la posibilidad de seguimiento de la eficiencia y la implementabilidad algorítmica de evaluación de relaciones entre datos a nivel diferente al primario.

## **Recomendaciones**

1. Continuar la formalización de la estructura y su incorporación como interfaz activa al SCADA-CITECT de la empresa.
2. Profundizar sobre los aspectos de calidad y seguimiento de eficiencia por las posibilidades de ahorro de energía y sus implicaciones.
3. Formalizar los elementos de rango para sincronismos y tolerancia de los parámetros particulares que se miden sobre cada parte, en el accionamiento, i.e mecánica, eléctrica, control, variabilidad de los puntos de consigna, e.g, intervalo de frecuencia, márgenes de flujo y consumo, partes involucradas (variador, plc, control, pwm, convertidor, otros motores)
4. Formalizar el seguimiento de la eficiencia como función global
5. Establecer los parámetros para campañas de experimentación.

## BIBLIOGRAFÍA

---

1. Guerrero. Y, Relaciones Proceso de Control – Protecciones. Facultad Metalurgica – Electromecánica. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2004.
2. Torres Castro .E. Trabajo de Diploma. Metodología de optimización de la Eficiencia de accionamiento Eléctricos en instalaciones de transportadores Hidráulico. Facultad Metalurgia – Electromecánica. Departamento Eléctrico. 2003.
3. Martínez Cautin Osmanda. Trabajo de Diploma. Estudio de la eficiencia de accionamiento de bombas de hidrot transporte de suspensiones no Newtonianas. Facultad Metalurgia – Electromecánica. Departamento Eléctrico. 2004.
4. Godinez Ramos Noel Erick. Trabajo de Diploma. Sistema Scada para accionamiento industrial con motores de inducción y Bombas centrifugas. Facultad Metalurgia –Electromecánica. Departamento Eléctrico. 2005.
5. Jara González R..J, Trabajo de diploma. Programa supervisor de accionamiento de bombas. Departamento Eléctrico. 2003.
6. Rojas Puro L. Turro, Izquierda R. Base de conocimiento para transporte eficiente de pulpa laterita en tecnología CARON. Minería y Geología. 2003.
7. Álvarez Domínguez J.L. Trabajo de Diploma. Funcionamiento de motor de inducción en elevadas frecuencias. Facultad Metalurgia – Electromecánica. Departamento Eléctrico. 1999.

8. Rojas Purón L. Trabajo de Tesis. Accionamiento Eléctrico Asíncrono para el Transporte Eficiente de Pulpa Laterita. Facultad Metalurgia – Electromecánica. Departamento de Ingeniería Eléctrica. ISMM, 2003.
9. Drive Technical Manual GPD 515/G5, Yaskawa. Instrucción Manual. 1997.
10. Electrical and Electronic controls and systems for industrial automation KLockner Moeller, main catalog. 1996/97.
11. General Electric. Instruction Manual. 469 Motor Management Relay.

**Paginas de Web**

12. <http://www.citect.com>.
13. <http://www.cujae.edu.cu/clca/trabajo/AUT046.pdf>.
14. <http://www.control automatico.com>.
15. <http://www.GEindustrial.com/Multilin>.
16. <http://www.monografias.com>.
17. <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/Eficiencia.pdf>.
18. <http://www.informationstore.net/fluke>.
19. [http://www.controlsoftware.es/hmi\\_scada.htm](http://www.controlsoftware.es/hmi_scada.htm).



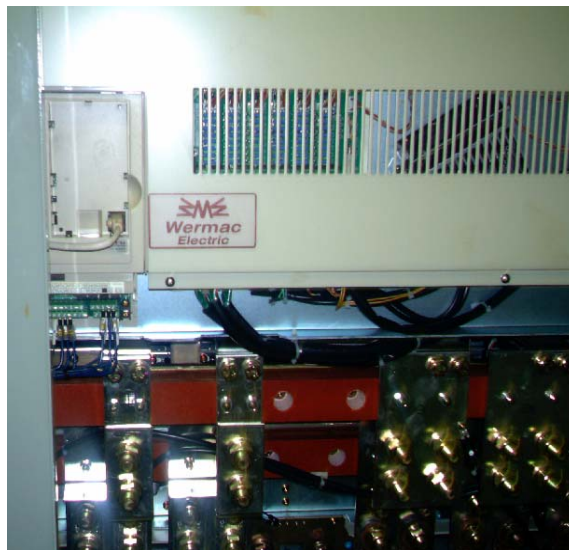
## ANEXOS

### ANEXO 1

(FOTOS TOMADAS EN LA PLANTA DE SULFUROS)



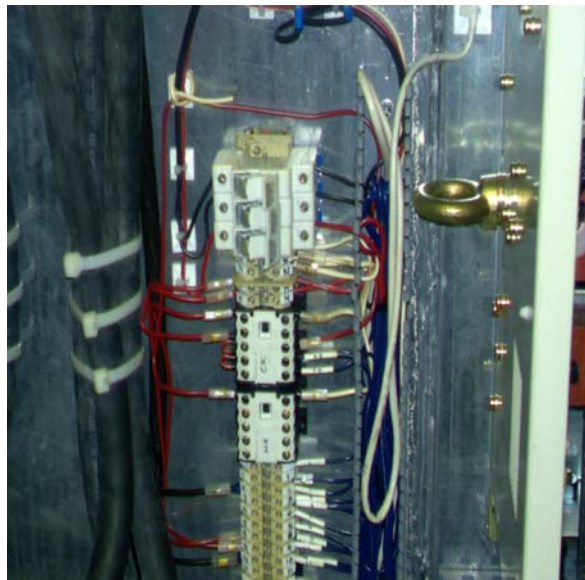
**INTERRUPTOR (BREAKER)**



**VARIADOR DE VELOCIDAD Y SUS CONEXIONES**



**TRANSFORMADOR ELEVADOR (0.48/1.16KV)**

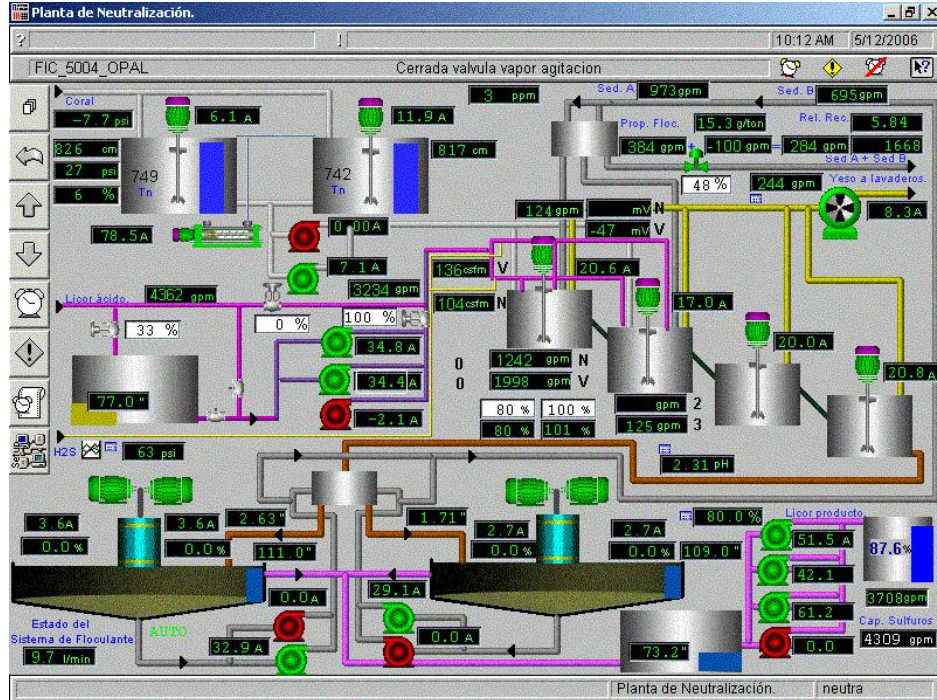


**CONEXIONES (REGLETA)**

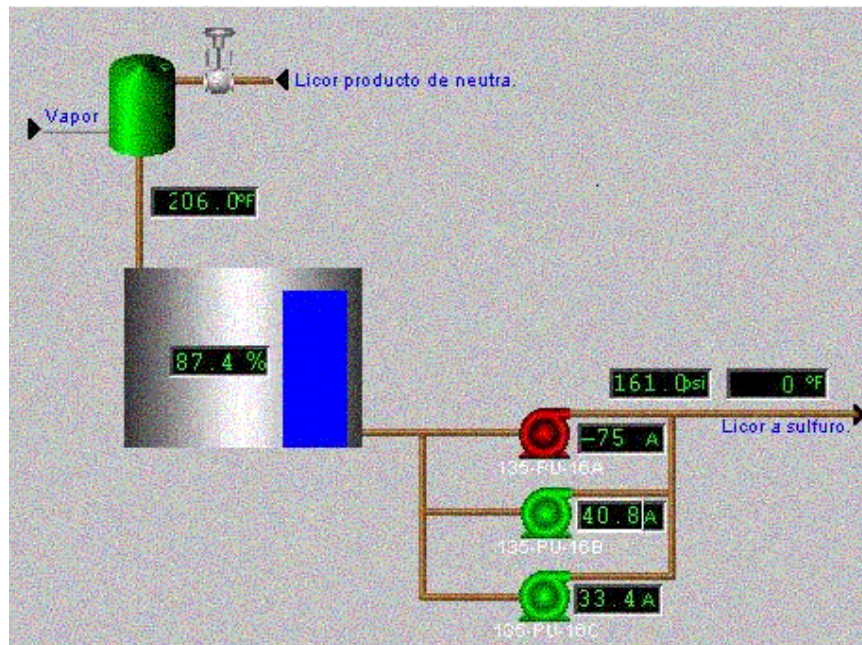


## MOTOR DE INDUCCIÓN (BOMBA CENTRIFUGA)

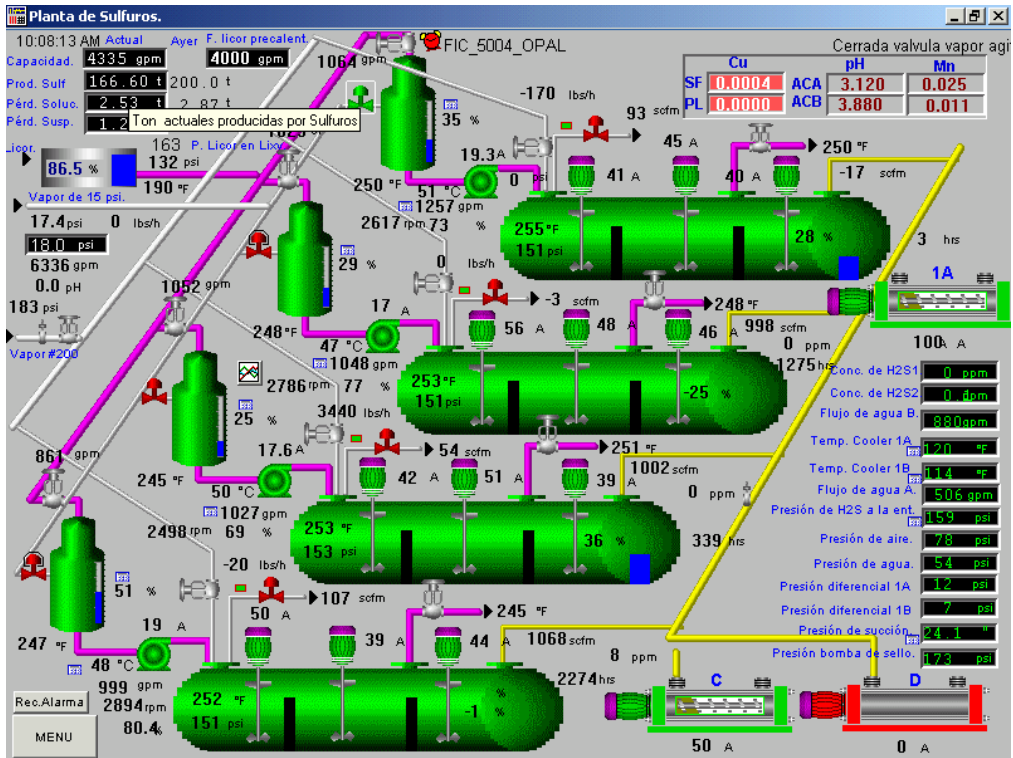
### Anexo 2



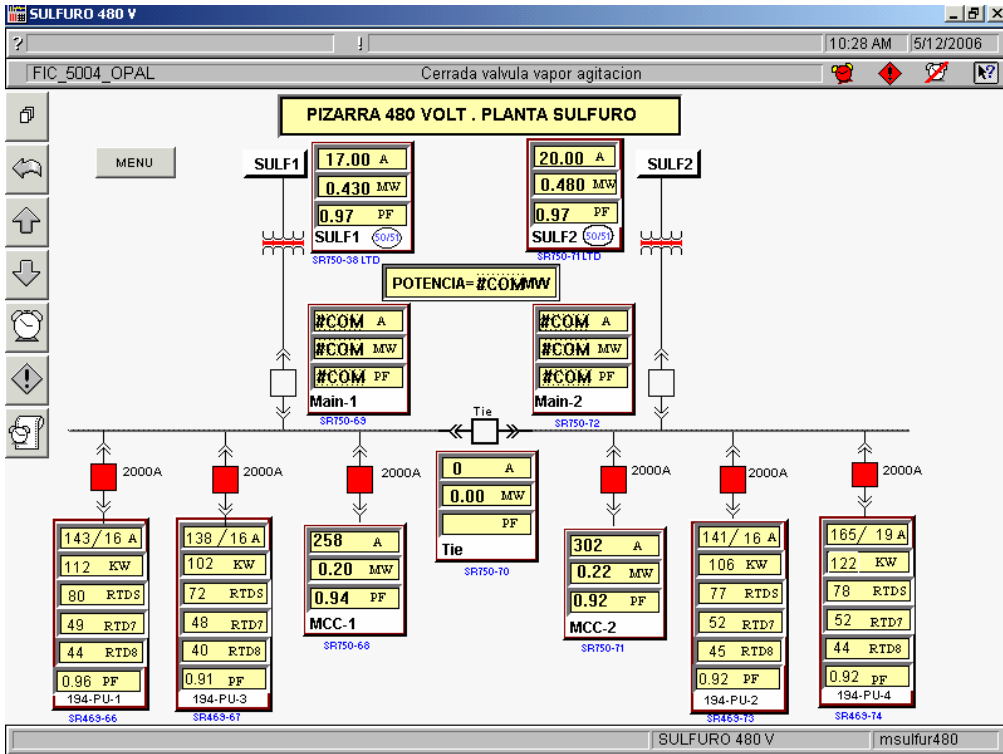
PANTALLA 1: PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN.



PANTALLA 2: PLANTA DE LIXIVIACIÓN.



PANTALLA 3: PLANTA DE SULFURO.

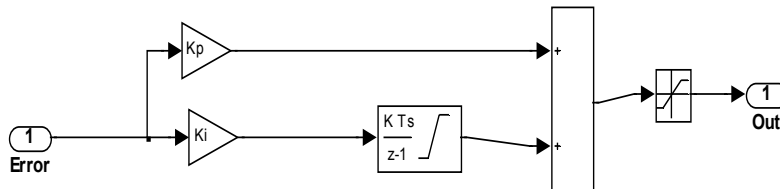


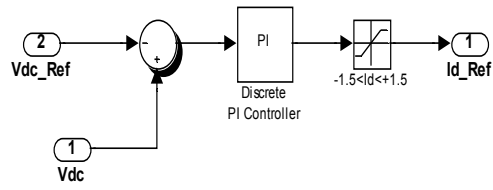
**PANTALLA 4: PIZARRA DE LA LANTA DE SULFURO.**

### Anexo 3

#### Discrete PID Controller

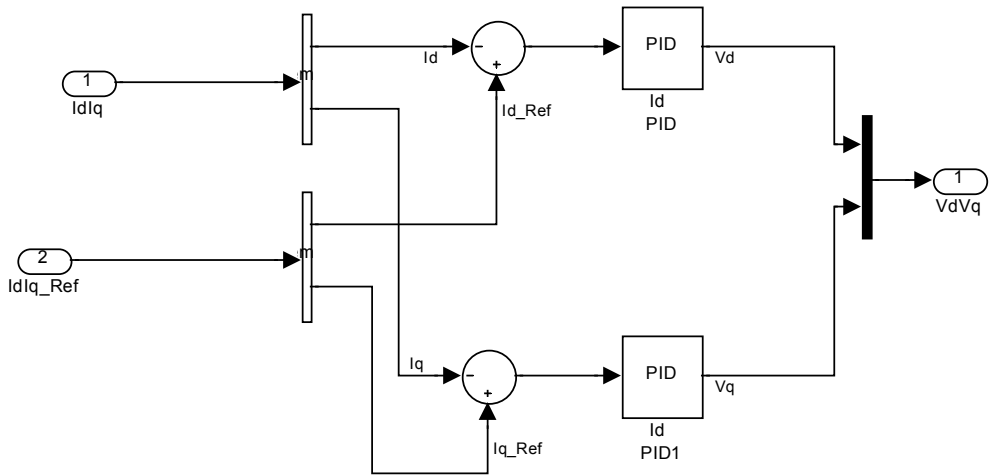
Pierre Giroux, Gilbert Sybille  
 Power System Simulation Laboratory  
 IREQ, Hydro-Quebec





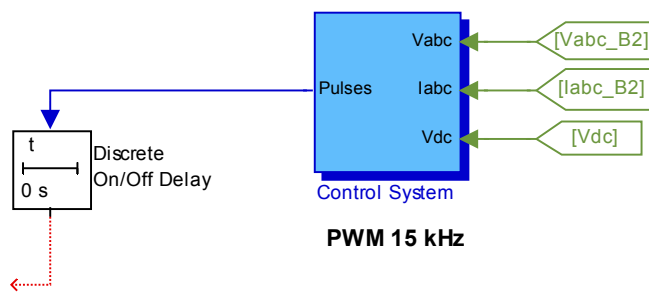
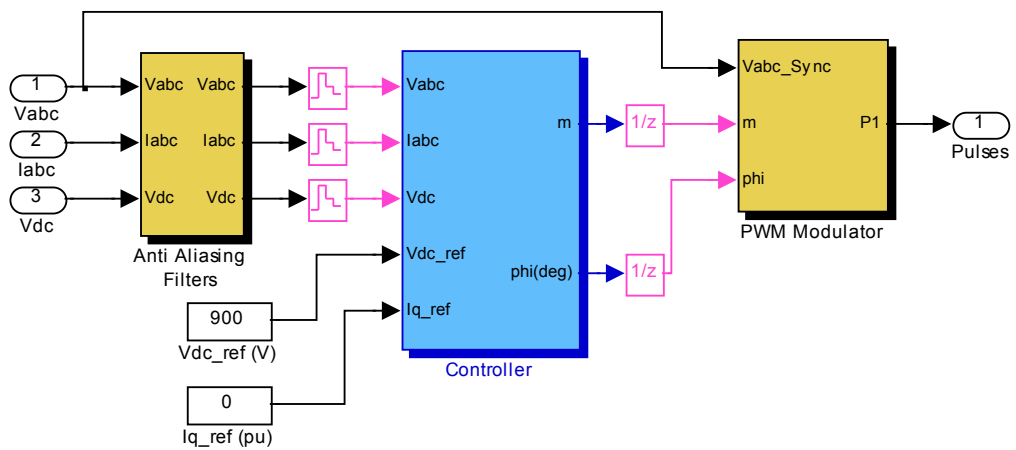
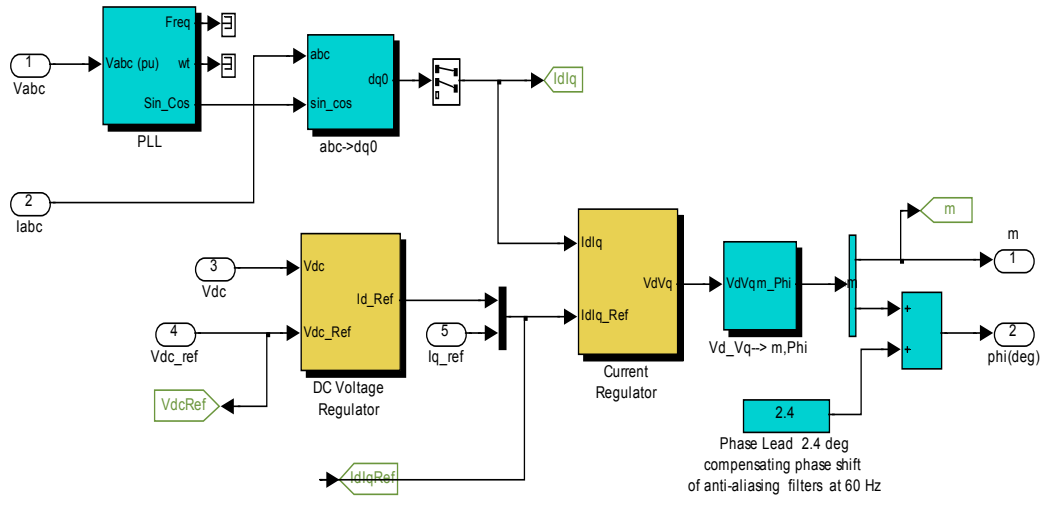
### Current Regulators

---



### Systeme de commande de l'onduleur

=====



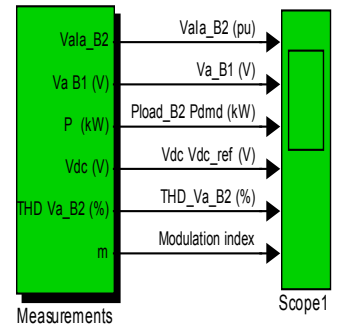
Harmonic distortion of B2 voltage as function of dead time  
at nominal output power 50kW PF=1.0; Vdc=900 V

Dead Time (us)	THD (%)	H5 (% of fund.)	H7 (% of fund.)	H11 (% of fund.)	15kHz+/-k*60Hz (% of fund.)	Modulation index
0	0.74	0.02	0.03	0.02	0.42	0.87
1	0.85	0.29	0.22	0.09	0.44	0.91
2	1.27	0.72	0.50	0.34	0.45	0.97
3	1.75	0.71	0.97	0.70	0.47	0.99

Notes:

1) The 'Model initialization function ' automatically sets initial states and sample times  
(Ts\_Power=0.5e-6 s and Ts\_Control=50e-6 s)  
(See Model Properties)

2) Using the Simulink Accelerator will speed up by more than X15 the execution of this model.



Double click here for details

