



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

**APLICACIÓN DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS EN EL MOVIMIENTO DE MOLINOS DE  
CAÑA UTILIZANDO MOTORES HIDRÁULICOS Y ELÉCTRICOS AC**

**Sergio Estuardo Rodríguez Osorio**

**Asesorado por Ing. José Luis Alfaro Donis**

**Guatemala, febrero de 2005**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**APLICACIÓN DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS EN EL MOVIMIENTO DE  
MOLINOS DE CAÑA UTILIZANDO MOTORES HIDRÁULICOS Y  
ELÉCTRICOS AC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SERGIO ESTUARDO RODRÍGUEZ OSORIO  
ASESORADO POR: ING. JOSÉ LUIS ALFARO DONIS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2005

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

## FACULTAD DE INGENIERÍA



### NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Durán Córdova
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández F.
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **APLICACIÓN DE SISTEMAS ELECTRÓNICOS EN EL MOVIMIENTO DE MOLINOS DE CAÑA UTILIZANDO MOTORES HIDRÁULICOS Y ELÉCTRICOS AC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 25 de septiembre de 2004.

**SERGIO ESTUARDO RODRÍGUEZ OSORIO**

## DEDICATORIA A

<b>Dios Padre</b>	Mi fortaleza, luz y guía
<b>Jesucristo</b>	Mi modelo e inspiración
<b>Espíritu Santo</b>	Quien produce en mi el querer como el hacer
<b>Mis padres</b>	Abel Rodríguez Méndez Rosa Amelia Osorio
<b>Mis hermanos</b>	Julio Enrique, Adriana, Claudia, Mónica, Gisela, Débora, Gabriela, Eduardo, Andrés.
<b>Mis sobrinos</b>	Saúl, Roberto, Ángela, Luis Ángel, Zabdi, Abigail, Andrea, Sergio Pablo, Cinthia, Alejandra, Allan, Sergio Luis, Jonathan, Jacqueline.
<b>Mi familia</b>	Tíos, tías, primos, primas.
<b>Mis amigos</b>	Walter Aguilar, Karla López, Iván Martínez.
<b>En especial a</b>	Gloria Galindo

## **AGRADECIMIENTO**

### **A Ing. José Luis Alfaro Donis**

Por asesorarme en la elaboración del presente trabajo.

### **A Ingenio La Unión S.A. e Ing. Carlos René Cifuentes Villatoro.**

Por permitir y apoyar la realización de mi trabajo de graduación.

### **Al personal de Ingenio La Unión S.A.**

en especial a:

Edwin Delgado, Estiven Recinos Colíndres, Luis Lima, César Cano, Mario Muñoz, Edwin Gamboa, Elfego Bautista, Enrique Velásquez, Ligia Rivas, Orlando Gonzáles y personal del Departamento Eléctrico y Departamento de Instrumentación.

Por su compañerismo y apoyo

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>VII</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>X</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XIII</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>XVI</b>

## **1. MARCO TEÓRICO**

1.1 Descripción de molienda en la fabricación de azúcar de caña	1
1.2 Descripción de un molino de caña	3
1.3 Sistema molino con turbina de vapor	11
1.4 Descripción de motor hidráulico con aplicación en molinos	15
1.5 Sistema molino con turbina de vapor y motor hidráulico	20
1.6 Sistema molino con motor AC	24

## **2. SISTEMAS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS EN UNIDADES HIDRÁULICAS HAGGLUNDS**

2.1 Mediciones y sensores utilizados	28
2.1.1 Sensor e interruptor de presión	29
2.1.2 Interruptores de nivel	29
2.1.3 Sensores de temperatura	30
2.1.4 Sensor de velocidad	31
2.2 Controlador local ( <i>Spider</i> )	32
2.2.1 Diagrama a bloques (lógico)	33

2.2.2	Entradas / Salidas	34
2.2.3	Configuración / Parametrización	40
2.2.4	Configuración del <i>software</i>	42
2.2.5	Protocolo de comunicación	46
2.2.6	<i>Data logger</i>	46
2.3	Controlador remoto	50
2.3.1	Diagrama a bloques	51
2.3.2	Controlador PLC	52
2.3.2.1	<i>Hardware</i>	52
2.3.2.2	<i>Software</i>	53
2.3.3	Interfase de operación	54
2.3.4	Comunicaciones	56

### **3. SISTEMAS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS EN MOTORES AC DE MEDIANA TENSIÓN DE ALTO CABALLAJE Y TORQUE CONSTANTE**

3.1	Teoría de rectificación trifásica	61
3.2	Dispositivos electrónicos de potencia para mediana tensión	65
3.2.1	SCR	67
3.2.2	IGBT	71
3.2.3	SGCT	75
3.3	Principios de variación de velocidad en motores AC con torque constante	77
3.4	Sistema controlador y lógica de operación	83
3.4.1	Diagrama a bloques	85
3.4.2	Entradas / Salidas	86
3.4.3	Interfase de operación	92
3.4.4	Configuración / Parametrización	95
3.4.5	Comunicaciones	97

3.4.6	Monitoreo	98
3.5	Algoritmo de control	99
3.5.1	Funcionamiento como torque constante o velocidad constante	99
3.6	Diferencias básicas entre el variador de frecuencia AC y DC	106
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	
4.1	Análisis energético orientado al ahorro y venta de energía eléctrica	109
4.1.1	Sistema con turbina	111
4.1.2	Sistema con turbina y motor hidráulico	112
4.1.3	Sistema con motor hidráulico y motor AC	114
4.1.4	Resultados	116
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>117</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>119</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXO</b>	<b>121</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Ilustración del área de preparación y molienda de la caña	2
2	Ilustración de un tandém de 5 molinos	3
3	Vírgenes y sus bancazos	4
4	Molino de tres mazas	5
5	Molino de cuatro mazas con vírgenes rectas	6
6	Rayado de mazas superior e inferior	8
7	Ranuras mesher	8
8	Posición de la cuchilla central en las mazas	9
9	Posición de peines, coronas y chumaceras en un molino	10
10	Turbina de vapor tipo impulsión	12
11	Tamaño de una catarina y piñón	14
12	Posición de la barra de acoplamiento y acoples	15
13	Representación de sistema molino con turbina de vapor	16
14	Motor hidráulico de anillos de levas	17
15	Conexión de motor eléctrico, bomba hidráulica, filtros y tanque	20
16	Molino con turbina de vapor y motor hidráulico	22
17	Brazo de torsión y su posición en el molino	23
18	Sistema molino-motor eléctrico	25
19	Esquema simplificado del sistema electrónico de control y monitoreo para el motor hidráulico	28
20	Módulo de termostatos, montado sobre tanque de aceite	30
21	Encoder	32

22	Diagrama a bloques del controlador	33
23	Diagrama lógico de la función de monitoreo	41
24	Configuración del puerto serial	42
25	Diagrama del cable de comunicación	43
26	Estructura básica del sistema de control	51
27	Estructura del PLC	53
28	Interfase remota con el operador	55
29	Diagrama a bloques que representa la comunicación de enlazamientos y alarmas colectivas para control interno entre las unidades de control	57
30	Diagrama a bloques que representa la unidad procesadora remota para el control externo	60
31	Rectificador trifásico no controlado	62
32	Rectificador trifásico controlado	64
33	Características frecuencia – potencia conseguidas, durante los años 90, para los distintos tipos de semiconductores de potencia	67
34	Estructura del SCR	68
35	Símbolo del SCR	68
36	Curva característica del SCR	69
37	Símbolos del IGBT	71
38	Estructura del IGBT y circuitos equivalentes	72
39	Curva característica estática de un transistor IGBT de canal-n	74
40	Símbolo del SGCT	75
41	SGCT con control de puerta integrado y estructura del SGCT	76
42	Control tensión-frecuencia constante en la máquina de inducción	80
43	Modelo de la máquina de inducción en variables de campo orientado	81

44	Diagrama a bloques del sistema de control PF7000	85
45	Diagrama eléctrico de señales de entrada a la tarjeta XIO	88
46	Diagrama eléctrico para las señales de salida en la tarjeta XIO	91
47	Terminal de interfase del operador para el variador PF7000	92
48	Pantalla típica y sus componentes	93
49	Pantalla principal	95
50	Medidores digitales de barra	98
51	Variador de velocidad por control tensión-frecuencia constante	100
52	Controlador de velocidad en coordenadas de campo orientado	102
53	Diagrama a bloques del sistema de control directo de par	104
54	Controladores de histéresis	104
55	Sectores del flujo	105

## **TABLAS**

I	Registros disponibles para configuración de los canales	49
II	Tabla óptima de conmutación	105
III	Resultados de consumo y ahorro de vapor, y venta de energía eléctrica	116
IV	Resultados de eficiencias	116

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>BJT</b>	Transistor de unión bipolar. Dispositivo semiconductor de potencia.
<b>cc</b>	Abreviación de corriente continúa.
<b>cm</b>	Abreviación de centímetros.
<b>COM1</b>	Puerto de comunicación serial 1.
<b>COM2</b>	Puerto de comunicación serial 2.
<b>D.O.S.</b>	Unidad de sistema operativo.
<b>dc</b>	Abreviación de corriente directa.
<b>DCS</b>	Sistema de control distribuido.
<b>GCT</b>	Transistor conmutado por puerta. Dispositivo semiconductor de potencia.
<b>GTO</b>	Transistor bloqueable por puerta. Dispositivo semiconductor de potencia.
<b>Hp</b>	Abreviación de caballos de fuerza. Dimensional de medida para la potencia mecánica.

<b>Hz</b>	Abreviación de hertz. Dimensional de medida para la frecuencia eléctrica.
<b>IGBT</b>	Transistor bipolar de puerta aislada. Dispositivo semiconductor de potencia.
<b>VA</b>	Volta-amperios. Dimensional de medida para la potencia aparente, KVA equivale a mil volta-amperios.
<b>W</b>	Watts. Dimensional de medida para la potencia real, Kw equivale a mil watts.
<b>LCD</b>	Pantalla de cristal liquido.
<b>LED</b>	Diodo emisor de luz.
<b>A</b>	Amperios. Dimensional de medida para la corriente, mA equivale a mili-amperios.
<b>MOSFET</b>	Transistor de efecto de campo de oxido metálico. Dispositivo semiconductor de potencia.
<b>PC</b>	Computador personal.
<b>PID</b>	Función proporcional integral derivativa.
<b>PLC</b>	Control lógico programable.

<b>PWM</b>	Modulación por ancho de pulso. Técnica utilizada en los inversores de potencia.
<b>RAM</b>	Memoria de acceso aleatorio.
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto. Dimensional de medida para la velocidad angular.
<b>SCR</b>	Rectificador controlado de silicio. Dispositivo semiconductor de potencia.
<b>SGCT</b>	Tiristor simétrico controlado por puerta. Dispositivo semiconductor de potencia.
<b><math>\alpha</math></b>	Representa el ángulo de disparo para los SCR.
<b><math>\omega</math></b>	Representa la velocidad angular de la señal eléctrica.
<b>a-b-c</b>	Representa a las ecuaciones no lineales del la máquina de inducción.
<b><math>\alpha</math> y <math>\beta</math></b>	Representa la transformación de las ecuaciones no lineales de la máquina de inducción a ecuaciones lineales.

## GLOSARIO

<b>Armónicos</b>	Corrientes o tensiones de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de la alimentación.
<b>Arrancador</b>	Relevador electromagnético, que incluye dispositivo de protección para motor eléctrico.
<b>Bagazo</b>	Se refiere a la fibra de la caña que se obtiene a la salida de los molinos, con un bajo contenido de agua.
<b>Cola de milano</b>	Espiga de forma especial para encajar dos piezas.
<b>Configuración</b>	Se refiere a la alimentación de información básica que necesita un sistema de procesamiento de información para operar correctamente.
<b>Contacto seco</b>	Se dice de un dispositivo semiconductor que opera como interruptor, conmutando entre los estados de conducción y no conducción.
<b>Contactador</b>	Relevador electromagnético. Que comúnmente opera como interruptor principal de potencia.
<b>Contactador auxiliar</b>	Relevador electromagnético. Que opera como interruptor secundario de potencia, y comúnmente es accionado por el movimiento mecánico del contactador principal.

<b>Encoder</b>	Disco codificado con marcas impresas digitalmente, convierte el movimiento giratorio de un eje en un código digital.
<b>Agua de imbibición</b>	Agua, generalmente caliente, que se aplica al bagazo que entra al último molino para facilitar la extracción de sacarosa.
<b>Interlock</b>	Integración mecánica de un contactor principal con un contactor auxiliar, con el fin de controlar el cierre del contactor auxiliar con la condición de cierre del contactor principal.
<b>Monitoreo</b>	Control de la operación de un sistema, por un medio visual.
<b>Parametrización</b>	Asignación de valores a las distintas variables que forman parte de la configuración de un sistema de control.
<b>Regular</b>	Se refiere a la operación de un sistema de control para mantener constante (en un valor determinado) a la variable en control (velocidad, presión, flujo, nivel, etc.).
<b>Repotenciación</b>	Agregar potencia a una máquina.
<b>Sacarosa</b>	La sacarosa de la caña de azúcar es un disacárido natural formado por el enlace bioquímico de los monosacáridos glucosa (azúcar de uvas o dextrosa) y fructuosa (azúcar de frutas o levulosa).

<b>Sensor</b>	Dispositivo electrónico que convierte la medición de una variable física (temperatura, presión, nivel, etc.) en una señal eléctrica proporcional al rango de medición.
<b>Señal eléctrica</b>	Señal de voltaje o corriente.
<b>Termostato</b>	Elemento compuesto por la unión de dos materiales metálicos que sufren una deformación con el aumento de la temperatura.
<b>Transmisor</b>	Dispositivo electrónico que convierte una señal eléctrica proveniente de un sensor, en otra señal eléctrica de uso estándar para equipos que adquieren datos como (PLC o DCS).
<b>Turbogenerador</b>	Máquina que convierte la energía térmica en energía eléctrica.
<b>Zafra</b>	Temporada de molienda. En Guatemala se lleva a cabo en un período aproximado de seis meses correspondiente a los meses de noviembre a abril.

## RESUMEN

En la actualidad se usan de cuatro a seis molinos en el proceso de molienda, a los que se les denomina tándem. Un molino de caña cualquiera que sea su tipo o tamaño esta compuesto por: vírgenes, mazas y sus ejes, cuchilla central y accesorios. Un molino necesita de una unidad motriz que le imparta el impulso necesario para que este pueda realizar trabajo, tradicionalmente esta unidad motriz ha sido una turbina de vapor. En el caso que se necesite aumentar la capacidad de las transmisiones de potencia en el molino, actualmente se puede utilizar transmisiones hidrostáticas desarrolladas específicamente para aplicaciones en molinos cañeros. Con la aparición y desarrollo de los variadores de velocidad, el motor eléctrico ahora entra a competir con las turbinas de vapor como una alternativa más para la impulsión de molinos cañeros.

El sistema electrónico utilizado para proteger, controlar y monitorear la unidad hidráulica esta compuesto por dos unidades procesadoras: la unidad procesadora local denominada *Spider* (por el fabricante del equipo), y la unidad procesadora remota. Para efectuar de manera eficiente el control, monitoreo y protección de la unidad hidráulica, las unidades de procesamiento local y remota se comunican entre si y constantemente están adquiriendo datos provenientes en forma de señales de voltaje y/o corriente de varios sensores instalados tanto en la unidad de potencia como en el motor hidráulico.

Los dispositivos electrónicos de potencia generalmente son utilizados para modificar las características de la energía eléctrica, principalmente su tensión y frecuencia. Los dispositivos de potencia como el IGBT, SCR, y SGCT son utilizados ampliamente en variadores de velocidad de mediana tensión tanto del lado del rectificador como del lado del inversor. Las técnicas de control de velocidad más ampliamente utilizadas en los variadores son: control por tensión-frecuencia o escalar, control por campo orientado o control vectorial, y control directo de torque (DCT).

Para un ingenio cogenerador, que es el caso de la Unión S.A. el ahorro de vapor en el proceso de producción de azúcar es importante, porque representa mayor venta de energía eléctrica a la red nacional. Y el hecho de buscar ahorro de vapor, obliga a la búsqueda e implementación de tecnologías más eficientes.

# **OBJETIVOS**

## **GENERAL**

Dar a conocer la aplicación de sistemas electrónicos utilizados en el manejo y control de motores hidráulicos y eléctricos utilizados en molinos de caña de azúcar, así como los beneficios obtenidos al utilizar estas unidades en ellos.

## **ESPECÍFICOS**

1. Dar a conocer las nuevas tecnologías usadas en la molienda en la industria azucarera de Guatemala.
2. Realizar un análisis de los sistemas electrónicos de control y monitoreo de los motores hidráulicos utilizados en molinos de caña..
3. Realizar un análisis de los sistemas electrónicos de control y monitoreo de los motores eléctricos AC de mediana tensión utilizados en molinos de caña.
4. Demostrar los beneficios obtenidos al sustituir en un molino de caña la turbina de vapor por un motor eléctrico AC de mediana tensión.
5. Demostrar las ventajas que se obtienen al utilizar un motor eléctrico AC versus un motor eléctrico DC.

# INTRODUCCIÓN

Para poder producir azúcar se necesitan varios procesos, el primer proceso en la producción de azúcar al que se somete la caña luego de ser cortada es la preparación o desmenuzado para luego pasar a molinos. El propósito de un molino es moler la caña preparada que pasa a través de él para poder extraer el jugo. Un molino esta constituido por una serie de mazas colocadas de forma adecuada, y para mejorar el proceso de molienda la caña preparada se hace pasar por varios molinos consecutivamente.

Un molino de caña parece ser un sistema simple, pero en si es un sistema complejo en el que se hace necesario monitorear y controlar varias variables, tal como la cantidad de caña que llega a él y que tiene una influencia directa en el movimiento del molino, ya que un exceso de caña puede causar que el molino se atore o provocar torques excesivos que pueden repercutir en roturas o daños mecánicos.

Una de las principales fuentes de energía en un ingenio es el vapor, que en efecto se ha utilizado como medio para impulsar las mazas de los molinos por medio de una turbina de vapor que generalmente es de una etapa, constituyendo así un sistema poco eficiente energéticamente y con limitaciones de capacidad. Actualmente existen otros sistemas para aumentar la capacidad y eficiencia del molino, muchos de ellos incluyen la conexión de un motor hidráulico o eléctrico.

Los motores utilizados en los sistemas de molinos poseen características especiales debido al tipo y cantidad de trabajo continuo que realizan, tales como control, monitoreo y seguridad.

Sustituir la turbina de vapor por un motor eléctrico aumenta la eficiencia energética del molino en un porcentaje significativo.

En el presente trabajo de graduación se estudian los sistemas electrónicos que forman parte esencial en el funcionamiento y operación de los motores hidráulicos y eléctricos utilizados en molinos.

En el capítulo uno se tratan conceptos básicos que permiten comprender el proceso de molienda, así como una descripción de diferentes sistemas de equipos usados.

En el capítulo dos se tratan los sistemas electrónicos utilizados para el control, monitoreo y operación de motores hidráulicos como comunicación, seguridad, configuración, incluyendo algunos de sus diagramas.

En el capítulo tres se analizan los sistemas electrónicos y de potencia de un motor y variador de corriente alterna, basado en la reciente aplicación en Ingenio la Unión S.A., ya que generalmente en la industria azucarera de Guatemala únicamente se han utilizado motores y variadores de corriente directa y motores hidráulicos.

Para finalizar en el capítulo cuatro se hace un análisis energético comparativo de los siguientes sistemas motrices para un molino: solo turbina, turbina y motor hidráulico, motor eléctrico y motor hidráulico.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1 Descripción de molienda en la fabricación de azúcar de caña

La molienda más primitiva de caña de azúcar se hacía con rodillos o cilindros verticales de madera, que eran impulsados por tracción animal, por fuerza hidráulica o por molinos de viento. Se atribuye a Smeaton el haber aplicado por primera vez tres rodillos horizontales o “mazas” en la forma triangular que se usa en la actualidad, y algunas autoridades en la materia mantienen que fue Smeaton quien inventó el primer molino con propulsión a vapor, en Jamaica en 1947. Empero, Deerr dice que la primera aplicación de la máquina de vapor a la molienda de caña de que se tiene conocimiento indiscutible ocurrió en Cuba en 1797.

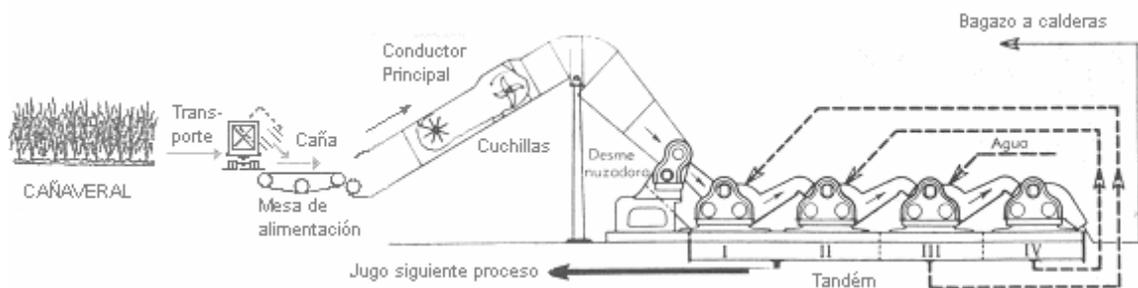
El proceso de molienda puede dividirse en dos partes:

1. La preparación de la caña mediante el quebrantamiento de la estructura dura y la fractura de las células.
2. La molienda de la caña.

En la figura 1, se ilustra el área de preparación y molienda de la caña. La preparación de la caña se hace de varias maneras diferentes:

- Mediante cuchillas giratorias que cortan la caña en astillas, sin extraer jugo.
- En desfibradoras que rasgan la caña en tiras, sin extraer jugo.
- Por medio de desmenuzadoras que quiebran y oprimen la estructura de la caña y extraen una gran parte del jugo.
- Por combinaciones de cualquiera o todos los métodos anteriores.

**Figura 1. Ilustración del área de preparación y molienda de la caña**

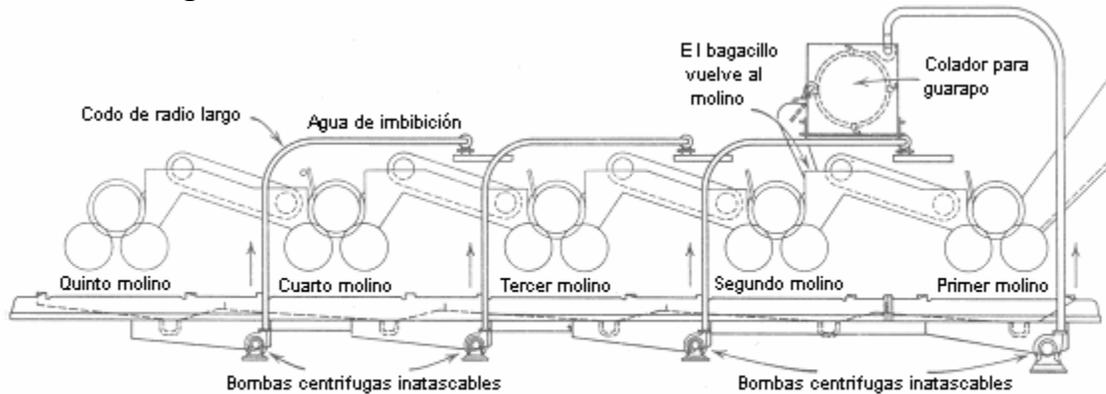


Fuente: **Manual de azúcar de caña**, Spencer – Meade, p. 44.

En la actualidad se usan de cuatro a seis molinos en el proceso de molienda, a los que se les denomina tandém. La caña preparada es conducida a los molinos por medio de unas bandas transportadoras, donde se realiza el proceso de extracción de la sacarosa, consistente en exprimir y lavar el colchón de bagazo a través del tándem de molinos. En otras palabras el colchón de caña preparada se hace pasar por cada molino y mediante presión se extrae el jugo que se recolecta en tanques. La caña al pasar por el primer molino pierde de 70 a 80% de su peso en jugo.

El bagazo que sale de un molino es conducido al siguiente por medio de un transportador de bagazo. Para lograr una buena extracción se lava el bagazo con agua o jugo pobre en sacarosa, esto se hace al salir de cada molino para diluir la sacarosa que aún está contenida en el bagazo y así aumentar la extracción para alcanzar más del 85% del azúcar que contenía la caña. Esta aplicación de agua se llama maceración o imbibición, esto se muestra en la figura 2, donde se ilustra para un tandém de 5 molinos, observar los transportadores de bagazo.

**Figura 2. Ilustración de un tandém de 5 molinos**



Fuente: **Manual de azúcar de caña**, Spencer – Meade, p. 75.

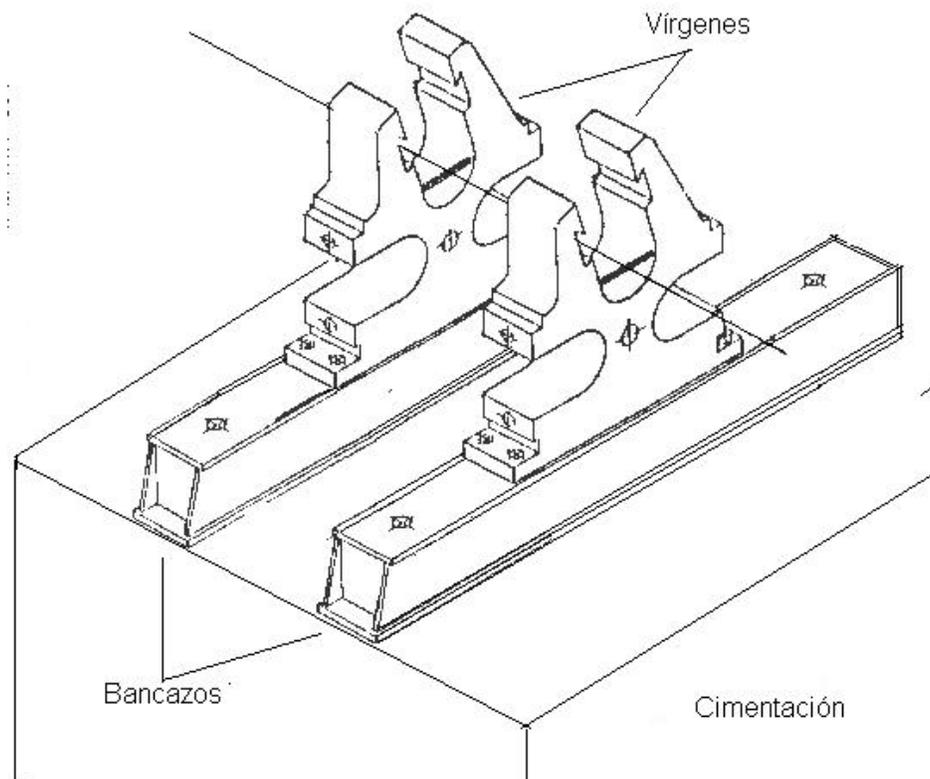
El bagazo que sale del último molino tiene aproximadamente 50% de humedad, 2 a 3% de sacarosa y 47% de fibra. Este bagazo se conduce a una bagacera para que seque y luego se va a las calderas para que sirva como combustible y produzca el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos para lograr su movimiento y en los turbogeneradores para producir la energía eléctrica.

## 1.2 Descripción de un molino de caña

Un molino de caña cualquiera que sea su tipo o tamaño está compuesto por: vírgenes, mazas y sus ejes, cuchilla central y accesorios. Entre estos últimos se mencionan los que son más comunes, cabezotes hidráulicos, chumaceras o cojinetes, peines, etc.

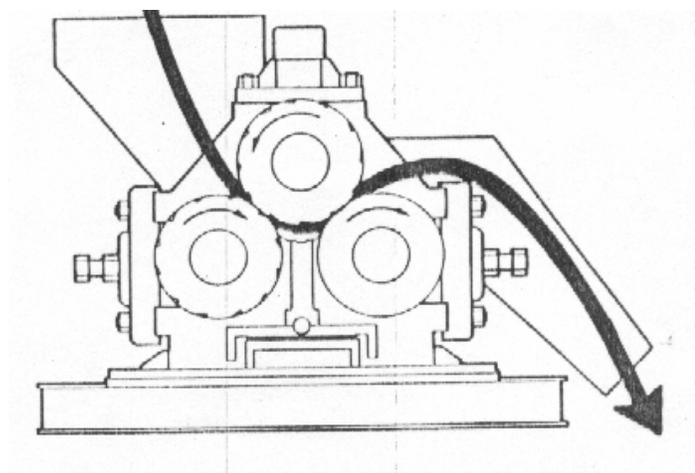
Un molino tiene dos vírgenes que son esencialmente las armaduras laterales, de diseño especial, que soportan las mazas y todos los accesorios del molino. Las vírgenes son armaduras muy pesadas, del orden de 8 a 12 toneladas cada una, construidas de acero al carbono fundido, y que se colocan paralelas entre sí a una distancia especificada. La mayoría van montadas sobre bancazos de hierro a los que se atornillan. Los bancazos a su vez se sujetan a los cimientos de concreto por medio de pernos de diámetro y largo calculados de acuerdo al tamaño del molino. El diseño de las vírgenes define el tipo y el número de mazas del molino. Existen diferentes tipos de vírgenes, las más usadas son conocidas como tipo recta y tipo inclinada. En la figura 3, se muestra las vírgenes alineadas sobre sus bancazos y su cimiento.

**Figura 3. Vírgenes y sus bancazos**



El diseño básico de los molinos en los ingenios hasta hace pocos años fue el molino de tres mazas. En un molino de este tipo las mazas están dispuestas formando un triángulo isósceles ya que esta configuración proyecta el peso de las mazas directamente sobre el cemento y no sobre las tapas laterales. En la figura 4 se muestra el diseño básico de un molino de tres mazas.

**Figura 4. Molino de tres mazas**

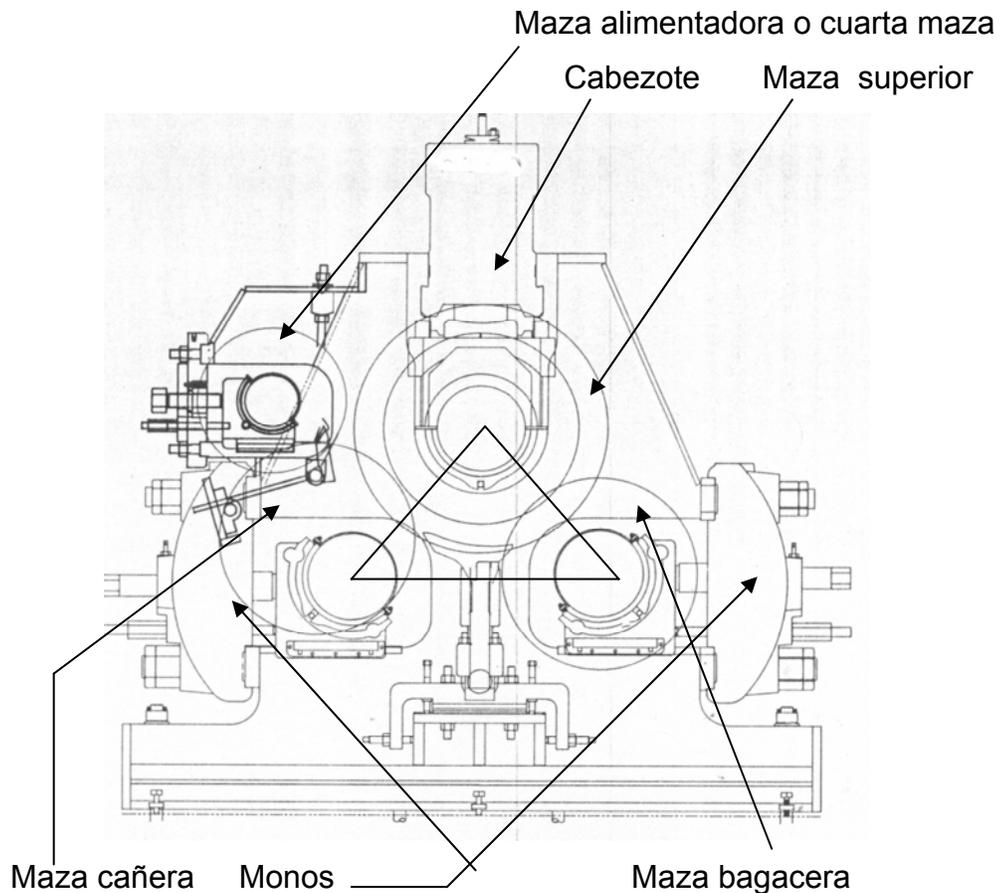


En años recientes a este diseño se le fueron agregando más mazas buscando más puntos de extracción del jugo de la caña en el mismo molino. Un molino de cuatro mazas conserva el diseño de uno de tres, pero se le agrega una cuarta maza paralela a la maza de arriba del lado de la entrada de caña. Esta cuarta maza hace la función de un rodo alimentador forzado.

Por su posición en las vírgenes de un molino cada maza recibe un nombre que la identifica y diferencia de las demás. A la maza de arriba (vértice superior del triángulo) se le llama maza superior, ya que es la que recibe la acción de la transmisión de potencia. Esta maza a su vez, es la que mueve a las dos de abajo y la cuarta maza.

En el lado de entrada de la caña al molino se encuentra la maza cañera y del lado de la salida esta la maza bagacera. Para mantener las mazas a la distancia requerida entre ellas, de acuerdo a la cantidad de caña que se quiera moler, los alojamientos en las vírgenes por donde entran las mazas, se cierran; en el caso de las mazas inferiores y la cuarta maza con tapas laterales llamados monos. Cada virgen tiene cuatro monos, dos cañeros y dos bagaceros. Estas tapas van atornilladas o con pasadores a las vírgenes. En el caso de la maza superior esta se encierra con cabezote hidráulico, la figura 5, muestra un molino de cuatro mazas y sus accesorios.

**Figura 5. Molino de cuatro mazas con vírgenes rectas**

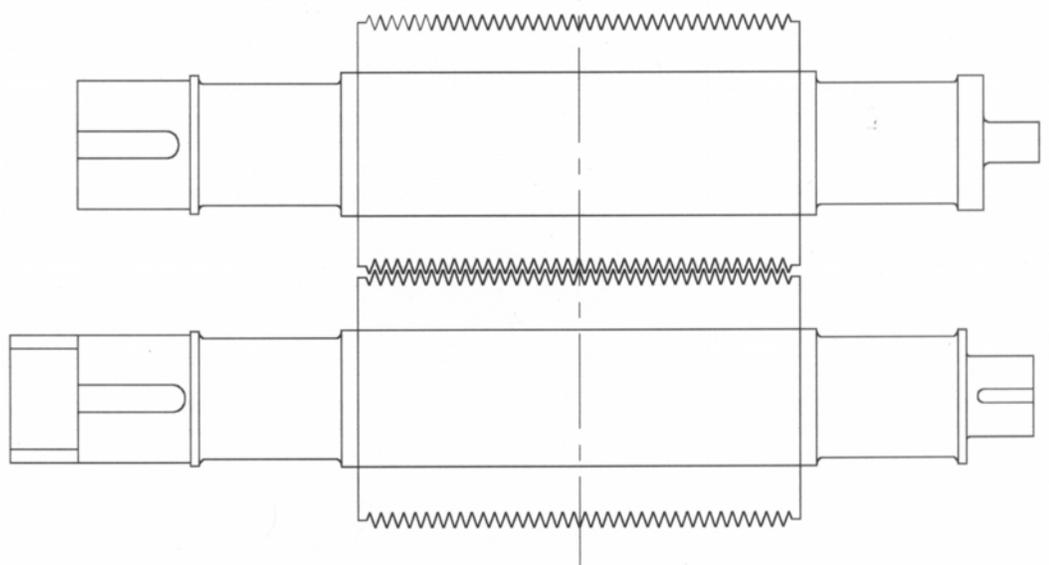


Fuente: Catalogo **Simisa**, Mills, p. 4.

Los cabezotes hidráulicos tienen como función mantener una presión constante prefijada e independiente sobre la maza superior para mantener su movimiento vertical uniforme no importando la fluctuación de la carga. Los cabezotes van colocados uno en cada virgen, cerrando el alojamiento donde entran los muñones de la maza superior.

Las mazas de un molino en realidad son cilindros de diseño y materiales específicos para la molienda de caña. Cada maza de un molino cañero está compuesto de un eje de acero forjado, bajo especificaciones propias para ese trabajo, sobre el cual se encaja a presión o en caliente una camisa de hierro de fundición gris. Originalmente las camisas se fabricaban lisas y actualmente tienen ranuras circulares distribuidas en su largo. Cada ranura tiene forma de triángulo con ángulos entre 35 y 55 grados con la punta y el fondo planos. A cada triángulo formado se le llama diente y al conjunto total de dientes a lo largo de la camisa se le denomina rayado de la maza. El adecuado encaje o traslape de los dientes permite dividir la caña en pedazos más pequeños en su paso entre las mazas, facilitando la extracción del jugo en los molinos subsiguientes, el traslape entre dientes de mazas se muestra en la figura 6.

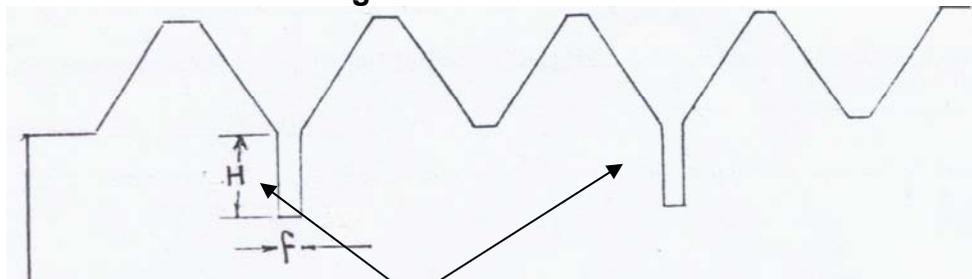
**Figura 6. Rayado de mazas superior e inferior**



Detalle de rayado y traslape de dientes.

Para facilitar la salida del jugo de la caña, al pasar éste entre las mazas, a las mazas se les hacen unas ranuras llamadas MESCHAERT (MESHER), ver figura 7.

**Figura 7. Ranuras mesher**

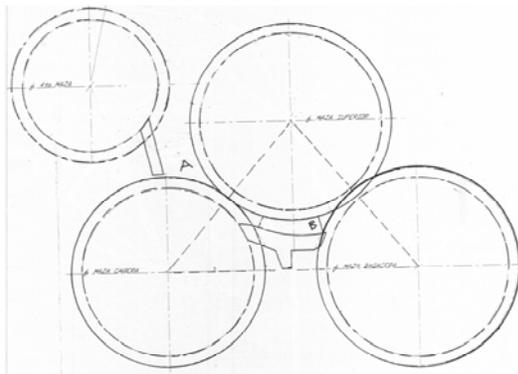


Ranuras c.

Entre las dos mazas inferiores queda un espacio vacío por el cual debiera seguir su curso la caña al pasar entre el molino. Ese espacio es donde va

colocada la cuchilla central. La finalidad de la cuchilla central es llenar ese espacio, a todo lo largo de las mazas, de modo que el flujo de caña sea continuo y el diseño de su perfil permite hacerlo con la menor fricción. En la figura 8, se denota con los puntos A y B respectivamente.

**Figura 8. Posición de la cuchilla central en las mazas**

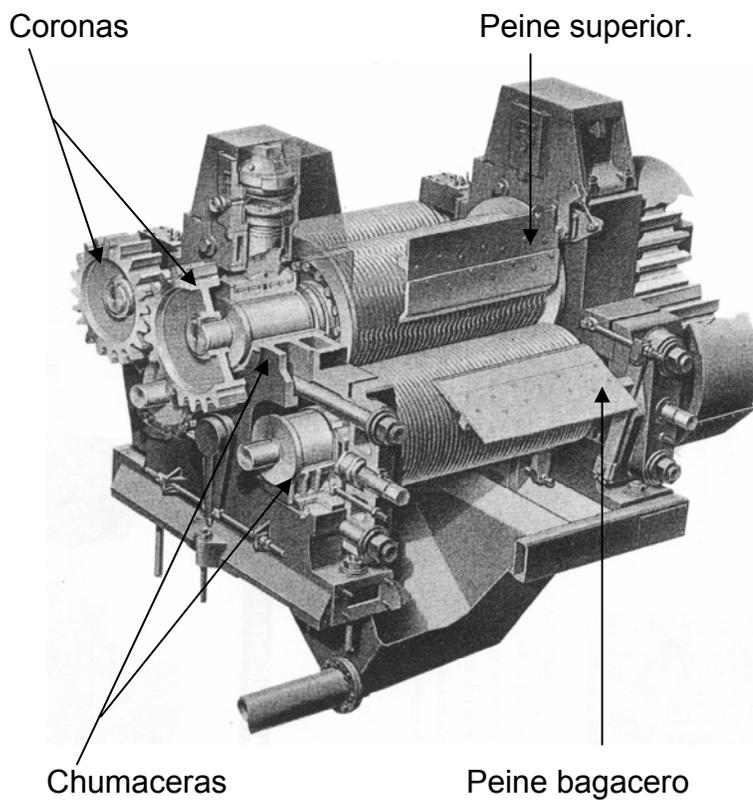


En el espacio comprendido entre las tangentes de las mazas superior y cañera, superior y bagacera se presentan las zonas de más alta presión y la fibra de la caña se mete entre los dientes. Si no se quita esa fibra la caña llenaría el rayado, las mazas quedarían como cilindros lisos; para desprender esa fibra se colocan los peines o raspadores. Si el peine trabaja en la maza superior se le conoce como peine superior y en la maza bagacera como peine bagacero.

En los extremos de las mazas se acoplan coronas las cuales tienen la función de transmitir la rotación de la maza superior a las otras mazas, las cuales son básicamente engranes con dientes de forma especial tallados sin cumplir con módulos de paso normalizado.

Las chumaceras o cojinetes son los soportes sobre los cuales se apoyan y giran los muñones de las mazas. La construcción de las chumaceras, aparte de tener que ser robusta, es muy complicada ya que en su interior deben tener canales por los que entra y circula agua que servirá para enfriamiento absorbiendo el calor generado entre el eje, el lubricante y el bronce, por las altas cargas al rotar las mazas. En la figura 9 se muestran los peines, las coronas y las chumaceras para un molino de cuatro mazas.

**Figura 9. Posición de peines, coronas y chumaceras en un molino**



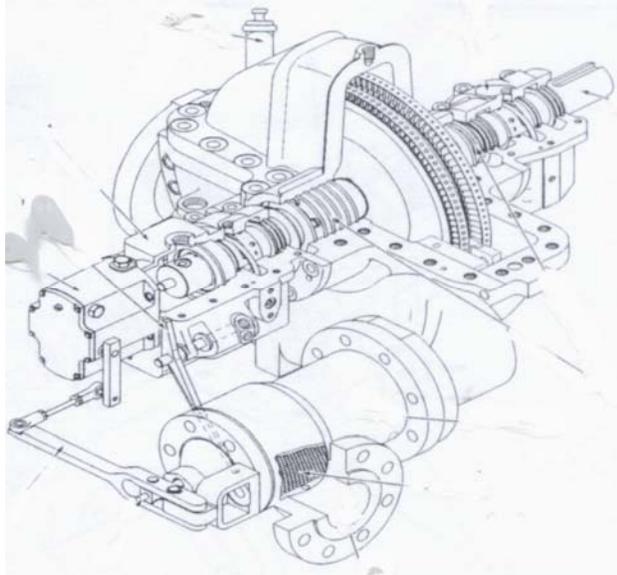
Fuente: Catálogo **Fletcher Smith**, The FS Mill, p. 5.

### **1.3 Sistema molino con turbina de vapor**

Un molino necesita de una unidad motriz que le imparta el impulso necesario para que este pueda realizar su trabajo. Tradicionalmente esta unidad motriz ha sido una turbina de vapor.

Las turbinas de vapor convierten la energía térmica disponible en el vapor, en energía mecánica. Se utilizan en los ingenios azucareros a partir de 1947 cuando empezaron a sustituir a los motores de vapor. Regularmente son turbinas de contrapresión de una etapa, del tipo de impulsión (curtís). El uso de este tipo de turbinas se debe a razones prácticas, por su diseño, que incluye entre otras características mayor robustez de los álabes, holguras amplias entre los elementos rotativos, empujes axiales mínimos, velocidades de operación bajas en su punto óptimo de operación y lo sencillo del rotor que es la principal parte móvil. El rotor de la turbina está compuesto por dos ruedas y el eje donde van montadas. Cada rueda lleva en su periferia una fila de alabes. Los alabes están ensamblados por un extremo con espiga de cola de milano a las ruedas. En el extremo exterior los alabes se aseguran entre ellos en grupos (segmentos) por medio de bandas de acero a las cuales se remachan. La razón para asegurar los alabes en segmentos es que, entre cada dos segmentos queda un espacio libre que permite la expansión y dilatación por temperatura. En la figura 12, se muestra una turbina tipo impulsión de una etapa.

**Figura 10. Turbina de vapor tipo impulsión**



Fuente: Catalogo **Dresser Rand**, Turbines, p. 2.

El vapor que se utiliza para operar las turbinas de los molinos, es generado en las calderas a una presión de 200 psig, este vapor, después de realizar el trabajo, sale con menos temperatura y a una presión de 20 psig, y es conocido como vapor de escape, y se utiliza en los procesos siguientes de calentamiento y concentración del jugo de caña.

Las condiciones de operación de las turbinas por las variaciones de carga que se dan en los molinos varían de una a otra. Así la velocidad de operación como la potencia generada es distinta en cada turbina. La mayoría de las turbinas de los molinos cañeros operan con velocidades entre 3600 y 5000 rpm y esa velocidad se reduce para que los molinos operen con velocidades entre 3.5 y 8.5 rpm. Para lograr esas reducciones de velocidades se instala un tren de reductores de velocidad.

Iniciando de la turbina hacia el molino, los reductores son conocidos como de alta velocidad, media velocidad y baja velocidad. Los reductores de alta y media velocidad son del tipo de transmisión encerrada y los de baja velocidad son del tipo de transmisión abierta.

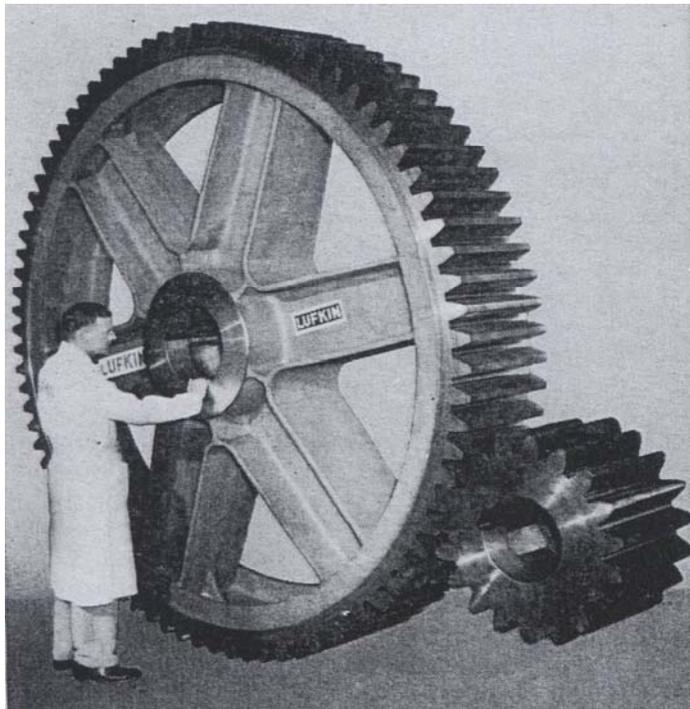
Para la primera reducción que se recibe de la turbina, debido a que la velocidad de entrada es muy alta, mayor de 300 rpm, se utilizan reductores de alta velocidad de ejes paralelos del tipo doble helicoidal de simple reducción.

Los reductores de media velocidad son de ejes paralelos del tipo doble helicoidal de triple o cuádruple reducción y reciben entre 1200 y 2500 rpm provenientes del eje de salida del reductor de alta y entregan de 5 a 40 rpm en la salida. Tanto los reductores de alta como de media velocidad por su tipo tienen la ventajas de operar con bajo ruido, potencias altas, ocupan relativamente poco espacio y el empuje axial es mínimo.

La última etapa de reducción regularmente es un conjunto de piñón y catarina. Esta reducción se caracteriza porque la relación del número de dientes de la catarina con respecto del piñón es muy alta. La catarina y el piñón tienen engranes del tipo de dientes rectos con perfil de involuta, esto hace que se pueda transmitir sin empuje ni desplazamiento axial, son silenciosos, transmiten grandes potencias y son económicos.

Las catarinas (engranes de mayor tamaño usados en los ingenios) debido a sus grandes diámetros son construidas tipo araña o estrella, su maza donde va el eje se une al aro exterior donde van los dientes por medio de brazos conectando maza y aro. En la figura 13 se observa el tamaño de una catarina y un piñón.

**Figura 11. Tamaño de una catarina y piñón**

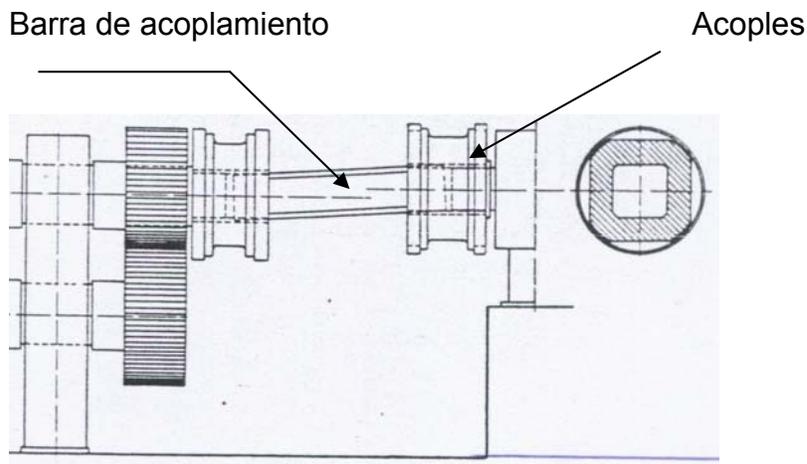


Fuente: Revista **Sugar y Azúcar**, Year book 1968, p. 128.

La maza superior recibe el movimiento giratorio, proveniente de la catarina, por medio de una barra de acero de sección cuadrada que se conecta en sus extremos a los ejes de la catarina y la maza, por medio de acoples. Esta barra de sección cuadrada se conoce como barra de acoplamiento o entredos.

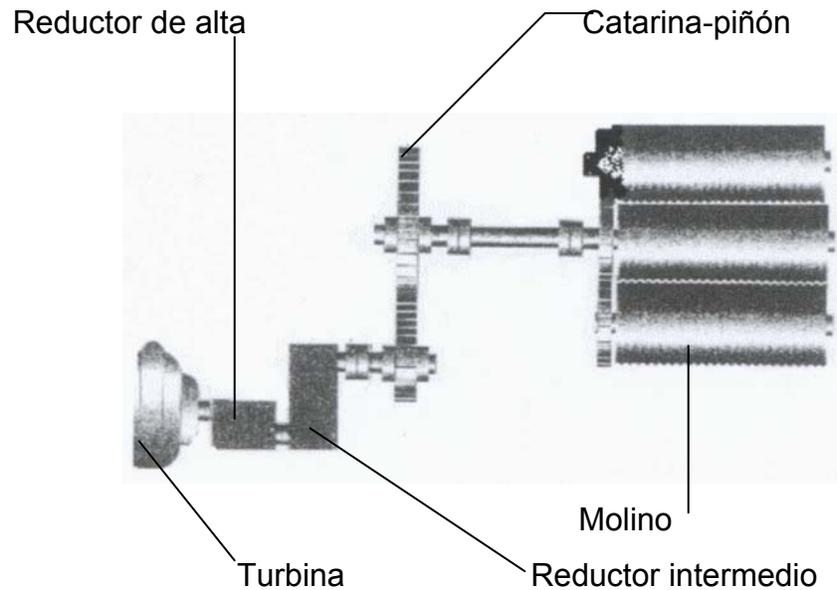
Al alinear la catarina con la maza superior en el sentido vertical, se pone el centro del eje de la catarina más alto que el centro del eje de la maza superior. Esta diferencia de altura entre centros de ejes permite que al flotar la maza superior, por efecto de la carga en el molino, la barra de acoplamiento se alinee horizontalmente y transmita el movimiento sin esfuerzos. Algunos fabricantes diseñan los acoples calculando que sean ellos los que se rompan, actuando como fusibles, al momento de una sobrecarga que haga flotar demasiado la maza superior. La figura 14, muestra la barra de acoplamiento, los acoples y la forma en que se colocan en el molino. La figura 15, representa el sistema completo molino con turbina de vapor.

**Figura 12. Posición de la barra de acoplamiento y acoples**



Fuente: **E. Hugot**, Handbook, p. 257.

**Figura 13. Representación de sistema molino con turbina de vapor**

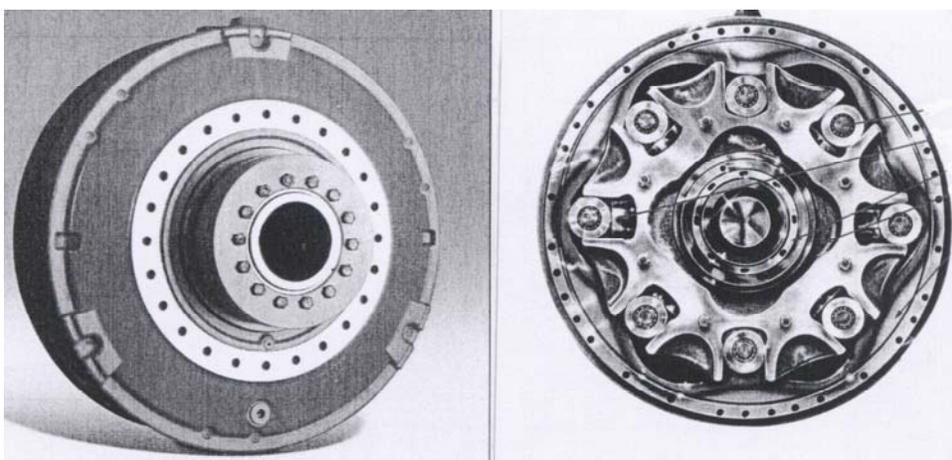


#### **1.4 Descripción de motor hidráulico con aplicación en molinos**

El motor hidráulico utilizado en molinos cañeros el cual describimos en este trabajo es del tipo de pistones de desplazamiento radial y de anillo de levas. Este consta de una carcasa fija, eje, bloque de cilindros circular, rodamiento guía, pistones, rodillos de leva, placa de válvulas, discos de levas y placa guía.

El bloque de cilindros va montado en la carcasa sobre cojinetes de rodillos que son los que transmiten el movimiento giratorio al eje. Los pistones se disponen generalmente en números pares y están situados radialmente al bloque de cilindros, y la placa de válvulas distribuye y dirige el fluido dentro y fuera de los pistones. Cada pistón actúa sobre un rodillo de leva situado en su extremo más alejado del eje. En operación cuando el fluido a alta presión actúa sobre los pistones, los rodillos de leva son empujados contra el anillo de levas que está conectado rígidamente a la carcasa y así produce el torque en el eje. La fuerza de reacción pasa por medio de los rodamientos guía, que están en los mismos ejes de los rodillos de leva, a las dos placas guía que están unidas al bloque de cilindros del eje haciéndolo girar y desarrollar un torque proporcional a la presión del sistema. La figura 10 muestra diferentes vistas de un motor hidráulico de este tipo.

**Figura 14. Motor hidráulico de anillos de levas**



**Fuente:** Catálogo **Hagglunds Drive Product Manual Maratón** EN 395, p. 5.

El motor hidráulico para su funcionamiento necesita: Motor Eléctrico, bomba hidráulica, tanque de aceite y accesorios.

El motor eléctrico es utilizado para manejar la bomba hidráulica, el cual puede ir montado vertical u horizontalmente y la velocidad recomendada para transmisiones hidráulicas es de 1750 revoluciones por minuto.

Las bombas hidráulicas que se usan en los sistemas hidráulicos en general son del tipo de desplazamiento positivo de descarga fija o variable. La función de la bomba hidráulica es, convertir la energía mecánica proveniente del motor eléctrico en energía hidráulica de trabajo, que es, una combinación de energía cinética y presión.

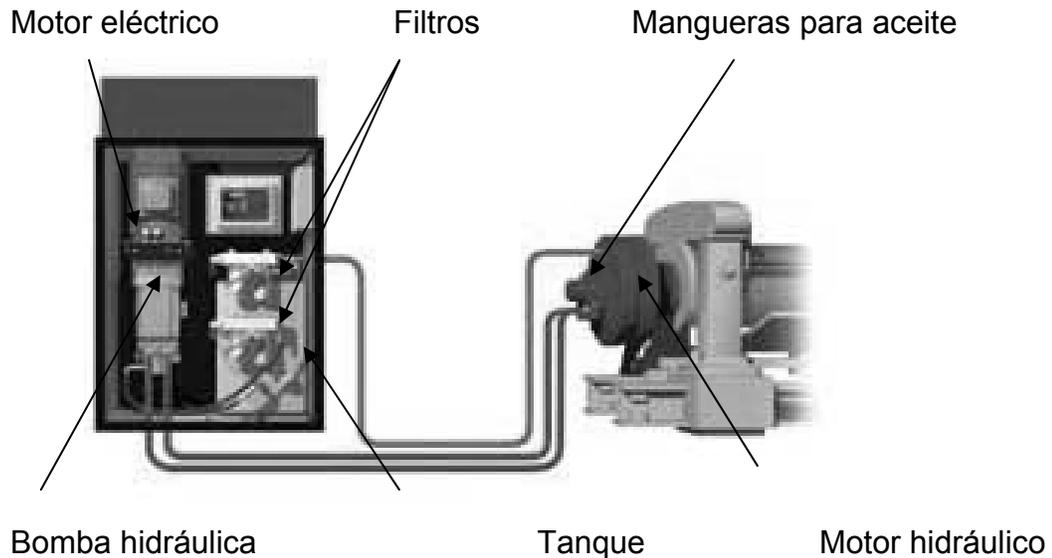
El diseño y tamaño del tanque de aceite de una transmisión hidrostática es de vital importancia para su funcionamiento adecuado. Un tanque bien diseñado además de contener el aceite también sirve para enfriarlo, permite que las materias extrañas contaminantes se asienten, ayuda al enfriamiento y facilita la salida del aire arrastrado en el aceite.

Los principales accesorios son los filtros y el intercambiador de calor. La función de un filtro en un sistema hidráulico es remover la suciedad del fluido hidráulico. Esto lo hace forzando la corriente del fluido a pasar a través de un elemento filtrante el cual atrapa la suciedad. Los filtros en un sistema hidráulico son indispensables pues en gran medida de ellos depende el tiempo de vida del equipo.

En todo circuito hidráulico hay una parte de la potencia empleada que por la ineficiencia se manifiesta en forma de calor. En el tanque de aceite se espera que se disipe el calor, pero no siempre es así, por lo cual deben usarse intercambiadores de calor con el objetivo de disminuir aun más la temperatura del aceite.

El funcionamiento es el siguiente: la energía mecánica proveniente de un motor, generalmente eléctrico, se utiliza para hacer girar una bomba hidráulica. La bomba hidráulica convierte esa energía mecánica en energía hidráulica, presión y flujo, la amplía e impulsa el fluido presurizado a través de tuberías y válvulas hacia el motor hidráulico. El motor hidráulico convierte la energía hidráulica en energía mecánica, velocidad y torque, para hacer girar su eje el cual moverá la carga aplicada. La velocidad del motor hidráulico depende del desplazamiento y de la tasa de flujo de la bomba hidráulica, y el torque depende de la presión y del desplazamiento del motor hidráulico. El aceite es drenado de nuevo al tanque pasando previamente por filtros y el intercambiador de calor para disponer de él nuevamente. La figura 11 muestra la conexión entre los elementos que forman el circuito hidráulico.

**Figura 15. Conexión de motor eléctrico, bomba hidráulica, filtros y tanque**



Fuente: [www.hagglunds.com](http://www.hagglunds.com)

### **1.5 Sistema molino con turbina de vapor y motor hidráulico**

El incremento de la capacidad de producción de un ingenio depende del aumento de la molienda. La capacidad de molienda está definida por el tamaño de los molinos y sus transmisiones de potencia. En la sección 1.4 se mencionó, que tradicionalmente un molino es movido por una turbina de vapor. En el caso que se necesite aumentar la capacidad de las transmisiones de potencia de los molinos cañeros, tradicionalmente la primera opción que se contempla es la sustitución de las transmisiones actuales por otras de mayor tamaño, lo cual implica un cambio completo del molino incluyendo las bases; actualmente se puede utilizar tecnología alterna consistente en transmisiones hidrostáticas desarrolladas específicamente para aplicaciones en molinos cañeros.

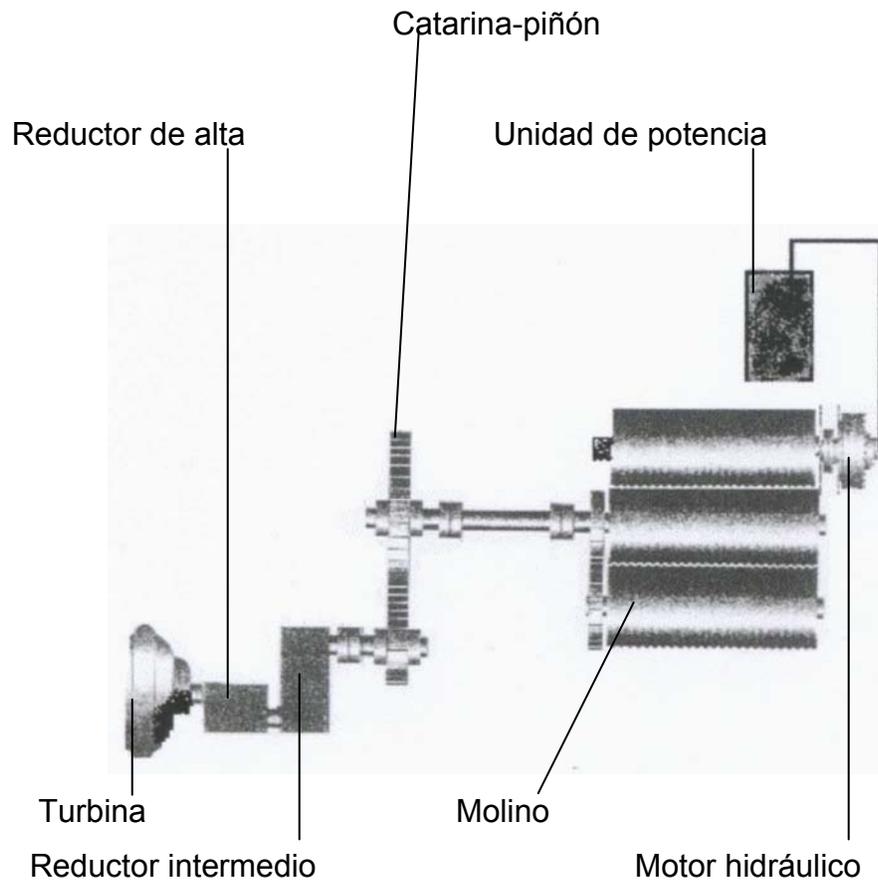
Para aumentar la capacidad del molino, se incorpora al sistema tradicional (molino-turbina de vapor) un motor hidráulico, con la idea de quitarle carga parcialmente a las transmisiones actuales, montando una transmisión hidrostática en una de las mazas inferiores del molino, lo cual se conoce como repotenciación. De esta forma el molino cuenta ahora con dos unidades motrices que lo impulsaran, aumentando de hecho su capacidad.

Anteriormente la turbina movía las cuatro mazas, en el nuevo sistema (molino-turbina de vapor más motor hidráulico) la turbina únicamente moverá tres mazas y el motor hidráulico moverá la maza restante. Las tres mazas con las que carga la turbina son: la maza superior, la cuarta maza y la maza bagacera; el motor hidráulico únicamente carga con la maza cañera.

Hacer la instalación en la maza cañera permite mantener uniforme el flujo de caña a través del molino, ya que ésta actúa en la entrada junto con la superior. Permite variar la velocidad de la maza cañera por debajo o por arriba del valor de velocidad de la maza superior.

El motor hidráulico se acopla directamente a la maza cañera, sin necesidad de reductores de velocidad, debido a que es capaz de operar a las bajas velocidades con las que operan los molinos, que regularmente son de 3.5 a 8.5 rpm. En la figura 16, se muestra el nuevo sistema.

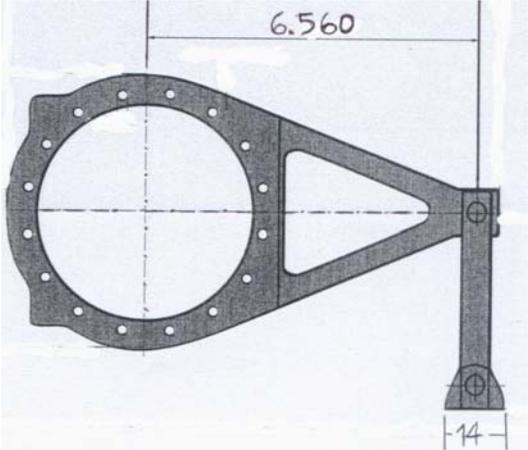
**Figura 16. Molino con turbina de vapor y motor hidráulico**



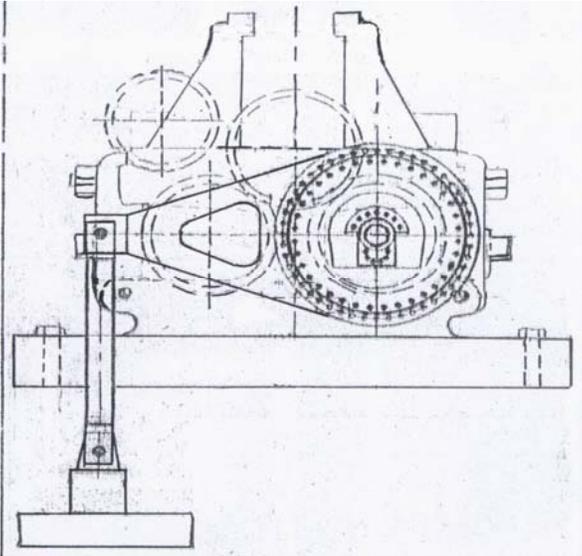
El motor hidráulico necesita de un brazo de torsión, el cual sirve para contrarrestar la reacción del torque desarrollado en el eje del motor. El brazo se ancla a una columna de acero que descansa sobre un pedestal de concreto. La posición del pedestal está definida por el largo del brazo y en dirección opuesta al giro del motor. En la figura 17, se muestra: a) el brazo de torsión y b) la posición de este en el molino.

**Figura 17. Brazo de torsión y su posición en el molino**

a) Brazo de torsión



b) Posición del brazo de torsión en el molino



## **1.6 Sistema molino con motor AC**

Se han usado máquinas de vapor para mover molinos de caña por más de 150 años. Y en 1925 se comenzaron a utilizar motores eléctricos para este servicio, pero siempre existió cierto desacuerdo respecto a sus ventajas y desventajas. Para aquel entonces se consideró que la mejor opción existente eran las turbinas de vapor y muchas de las instalaciones más antiguas que poseían movimiento a máquinas de vapor fueron modernizadas mediante la instalación de turbinas de vapor. Una de las principales razones por la que se optó por la turbina de vapor, que para aquel entonces era la ventaja principal de la turbina sobre el motor eléctrico, era la facilidad con la que se podía variar la velocidad en un amplio rango.

Actualmente el problema de regulación de velocidad en motores eléctricos a quedado resuelto con la aparición y desarrollo de los variadores de velocidad. Aunque, en un principio estos variadores de velocidad fueron desarrollados para motores de baja tensión, actualmente se dispone en el mercado de variadores para motores de mediana y alta tensión.

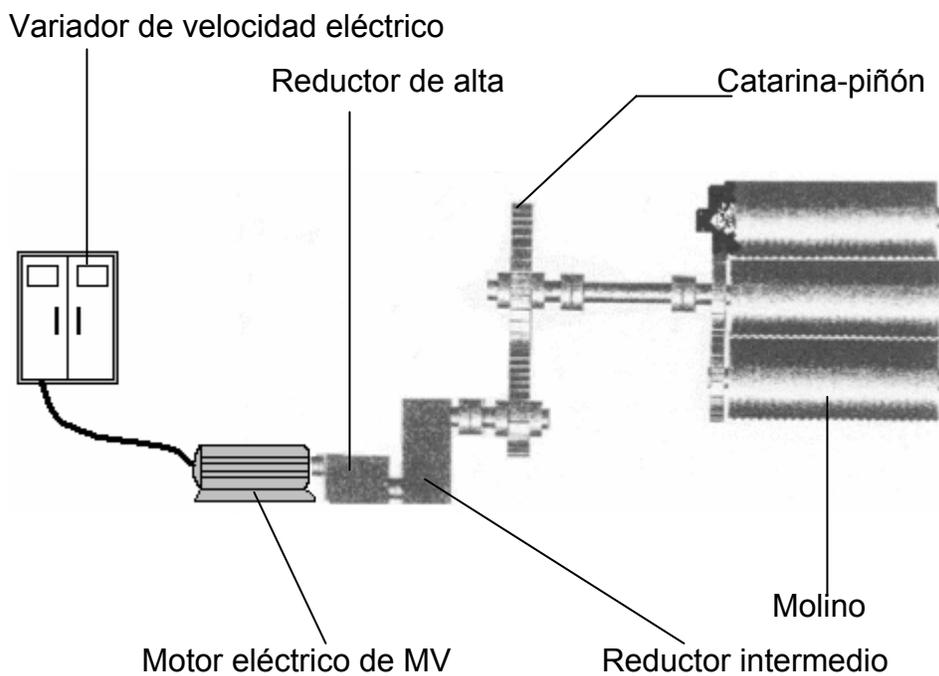
El motor eléctrico ahora entra a competir con las turbinas de vapor como una alternativa más para la impulsión de molinos cañeros.

Como los molinos de caña están formados por equipo muy pesado el motor eléctrico que se instala como unidad motriz, es un motor de alto caballaje para mediana tensión.

Específicamente en Ingenio la Unión S.A. las turbinas de vapor se sustituyeron por motores eléctricos de 1000 hp para 2.4 Kv.

Si fuese necesario aumentar la capacidad del sistema “molino-motor eléctrico” se puede repotencializar con una unidad hidrostática como se describió en la sección 1.5. En la figura 18, se muestra el sistema molino-motor eléctrico.

**Figura 18. Sistema molino-motor eléctrico**



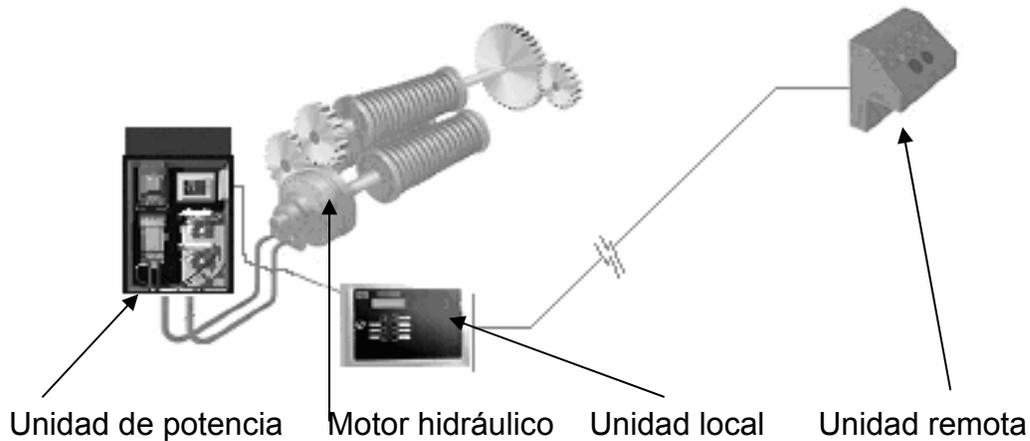
## 2. SISTEMAS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS EN UNIDADES HIDRÁULICAS HAGGLUNDS

Este capítulo está basado en los sistemas electrónicos utilizados para operar y monitorear las unidades hidráulicas *Hagglunds*, utilizadas en Ingenio la Unión S.A. para repotencializar los molinos.

El sistema electrónico utilizado para proteger, controlar y monitorear la unidad hidráulica está compuesto por dos unidades procesadoras: la unidad procesadora local denominada *Spider*, y la unidad procesadora remota.

La unidad procesadora local regularmente está montada dentro de la unidad de potencia, y la unidad de potencia se encuentra instalada cerca del motor hidráulico. La unidad remota se encuentra instalada en el cuarto de control cerca de un operador. El cuarto de control puede encontrarse a una distancia considerada, lejos del motor hidráulico, esto se ejemplifica en la figura 19.

**Figura 19. Esquema simplificado del sistema electrónico de control y monitoreo para el motor hidráulico**



Fuente: [www.hagglunds.com](http://www.hagglunds.com)

Para efectuar de manera eficiente el control, monitoreo y protección de la unidad hidráulica, las unidades de procesamiento local y remota se comunican entre si y constantemente están adquiriendo datos provenientes en forma de señales de voltaje y/o corriente de varios sensores instalados tanto en la unidad de potencia como en el motor hidráulico.

## **2.1 Mediciones y sensores utilizados**

La unidad hidráulica cuenta con un sistema electrónico dedicado a la regulación y monitoreo de las distintas variables que se necesitan para el correcto funcionamiento del equipo.

Estos equipos, son fabricados específicamente para este propósito y cuentan con la posibilidad de manejar toda la información y la habilidad de configuración que se requiere. Regularmente están compuestos por equipos fabricados en diferentes compañías y en base a una experiencia común se integran para la aplicación.

El microprocesador puede monitorear la condición general del equipo por medio de interruptores (*switches*) y sensores instalados en los distintos puntos críticos del sistema y los presenta al operador con textos entendibles por ejemplo, bajo nivel de aceite, alta temperatura de aceite, etc.

### **2.1.1 Sensor e interruptores de presión**

**Interruptor de presión.** Se utiliza para monitorear la baja presión de carga, este se encarga de indicar al sistema cuando la presión de carga ha llegado a niveles muy bajos para la operación correcta de la bomba, al cerrar sus contactos.

**Sensor de presión.** Se utiliza para medir la presión de descarga de la bomba. Este sensor incorpora un transmisor de presión proporcional que convierte la lectura de presión del aceite en una señal de corriente de 4 – 20 miliamperios de uso estándar en sistemas de automatización, 4 miliamperios corresponde a 0% de presión y 20 miliamperios corresponde al 100% de la presión máxima esperada.

### **2.1.2 Interruptores de nivel**

El sistema cuenta con dos interruptores de nivel instalados en el tanque de aceite, estos se encuentran en un juego de flotes ubicados dentro del tanque.

La disminución del nivel de aceite activa una señal por medio de los flotes. Las señales pueden ser por bajo nivel de aceite, o por mínimo nivel de aceite.

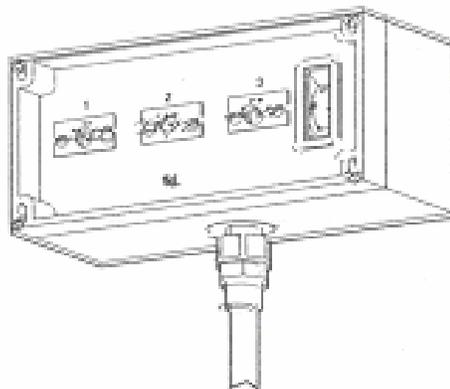
La señal de bajo nivel de aceite activa en pantalla un aviso de precaución que indica que el nivel de aceite esta disminuyendo, los contactos de este interruptor están normalmente cerrados en la operación, y abren para activar la señal. La señal de mínimo nivel de aceite dispara el sistema parando incluso el motor eléctrico por haberse alcanzado el mínimo nivel de aceite en el tanque, los contactos de este interruptor están normalmente cerrados en la operación, y abren para activar la señal.

### 2.1.3 Sensores de temperatura

Dentro del tanque se encuentran tres termostatos que controlan tres señales dependiendo del nivel de la temperatura del aceite en el tanque. Están montados en un módulo instalado sobre el tanque, que se muestra en la figura 20, en él se puede graduar la temperatura de operación individual de cada termostato.

**Figura 20. Módulo de termostatos, montado sobre tanque de aceite**

3 switches



Fuente: Catálogo **Hagglunds Drives**, **installation and maintenance**, P. 10.

El primer termostato esta graduado a una temperatura de 40°C , cuando esta temperatura es alcanzada el sistema se encarga de activar la válvula de agua de enfriamiento, para lograr mantener la temperatura ideal de operación. El segundo termostato esta graduado a una temperatura de 65°C, si después de activar la válvula de agua de enfriamiento y a pesar de ello la temperatura sigue en aumento, al alcanzar esta temperatura este termostato envía una señal para activar una luz piloto y un mensaje de precaución en pantalla. El tercer termostato esta graduado a una temperatura de 70°C, cuando el aceite alcanza esta temperatura el termostato envía una señal que hace que el sistema realice un disparo total de la unidad hidráulica y del motor eléctrico.

#### **2.1.4 Sensor de velocidad**

Una de las principales variables de la unidad hidráulica es la variación de velocidad que se obtiene a la salida del motor hidráulico. Para hacer la medición de la velocidad, se utilizan medidores ópticos especiales que son conocidos industrialmente como *encoders*, los cuales pueden presentar instantáneamente el valor de la velocidad de manera exacta. En términos básicos un *encoder* óptico consiste de un disco codificado con marcas impresas digitalmente que está acoplado al eje del motor hidráulico.

El disco al rotar es leído por una cabeza estacionaria la cual convierte el movimiento giratorio del eje en un código digital, a la vez, el código digital es convertido a una señal de 4 – 20 miliamperios de uso estándar en los sistema de automatización. En la figura 21, se muestra un *encoder*.

**Figura 21. Encoder**



Fuente: Catálogo **Hagglunds Drives**, Product manual marathon, p. 20.

El encoder se encuentra montado sobre el motor hidráulico acoplado directamente al eje del motor y es manejado por la unidad procesadora del motor hidráulico que en este caso es la unidad local o *Spider*.

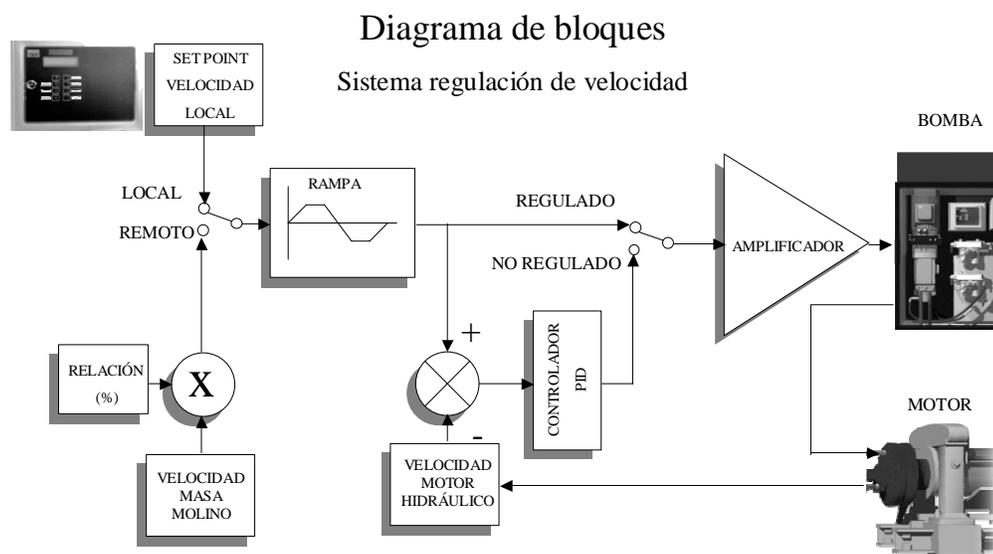
## **2.2 Controlador local (*Spider*)**

La unidad de control local esta basada en un microprocesador el cual se configura para adaptarse a la aplicación y está diseñado para poder manejar una o dos bombas trabajando interrelacionadas o independientemente. La unidad puede ser montada dentro del gabinete de la unidad de potencia o en un lugar diferente que facilite el acceso del operador. La unidad puede configurarse desde un teclado elemental de ocho botones en donde, por medio de una pantalla de dos líneas de texto, se selecciona cada una de las opciones de control (entradas/salidas, regulación, alarmas, disparos, textos de alarmas, etc.).

## 2.2.1 Diagrama a bloques (lógico)

- Una de las principales funciones del controlador electrónico es la regulación de velocidad. En la figura 22, se muestra el diagrama a bloques del controlador.

Figura 22. Diagrama a bloques del controlador



Fuente: [www.Hagglunds.com](http://www.Hagglunds.com)

El procesador cuenta básicamente con tres funciones:

- Adquirir y acondicionar la señal (convertir la señal análoga a digital).
- Regular automáticamente con un algoritmo de control proporcional integral y derivativo (PID), o no regulación, por seguimiento directo.

- Acondicionar y convertir de digital a analógica la señal proporcional de salida hacia la válvula proporcional que regula el flujo de descarga en la bomba hidráulica.

La retroalimentación de velocidad hace posible mantener una velocidad constante (regulada) en el eje del motor hidráulico. El *Spider* o controlador local compensa los cambios de velocidad debido a los cambios de carga. Para lograr esto un regulador PID es implementado en el software. Este regulador PID compara el valor de la velocidad actual en el motor con la velocidad ajustada o sintonizada por el operador. Una desviación entre las dos señales es detectada como una señal de error y transferida al regulador PID, el cual se encarga de corregir la velocidad del motor al valor programado. El regulador PID tiene tres etapas diferentes:

**Etapas proporcional.** La etapa proporcional amplifica la señal de error. La salida es proporcional a la señal de error.

**Etapas integral.** La etapa integral integra la señal de error. Una señal de error pequeña, creará en el tiempo una etapa de salida integral grande.

**Etapas derivativa.** La etapa derivativa deriva una señal de error. Un cambio rápido creará en el tiempo una salida grande desde la etapa derivativa.

Los resultados de las tres diferentes etapas son sumadas a la salida del regulador de la bomba hidráulica (válvula proporcional).

### **2.2.2 Entradas / Salidas**

Básicamente las señales de entrada y salida se pueden dividir de la siguiente manera:

- a) Señales de sensores ubicados en la unidad de potencia.
- b) Señales de *encoder*, arranque, paro y paro de emergencia del motor eléctrico.
- c) Señales de comunicación entre unidad procesadora local y unidad procesadora remota.

#### **a) Señales de sensores ubicados en la unidad de potencia**

Todas las señales de los sensores en la unidad de potencia se comunican directamente al controlador local (*Spider*), y se denominan señales de protección o monitoreo. Estas señales son las siguientes:

#### **Alto nivel de temperatura**

Conectado a un contacto normalmente cerrado proveniente del termostato 2, sección 2.1.3. Cuando el termostato detecta que la temperatura del aceite dentro del tanque ha alcanzado los 65°C abre sus contactos.

#### **Máximo nivel de temperatura**

Conectado a un contacto normalmente cerrado proveniente del termostato 3, sección 2.1.3. Cuando el termostato detecta que la temperatura del aceite dentro del tanque ha alcanzado los 70°C abre sus contactos.

### **Bajo nivel del aceite**

Conectado a un contacto normalmente cerrado proveniente de uno de los flotadores del tanque de aceite. Los contactos se abren cuando el nivel del aceite en el tanque ha alcanzado 20 cm medidos desde la parte superior del tanque.

### **Mínimo nivel del aceite**

Conectado a un contacto normalmente cerrado proveniente de uno de los flotadores del tanque de aceite. Los contactos se abren cuando el nivel del aceite en el tanque ha alcanzado 26.5 cm medidos desde la parte superior del tanque.

### **Filtro de retorno**

Es un interruptor diferencial con contactos normalmente cerrados. Abre los contactos para indicar cuando se encuentra sucio u obstruido el filtro impidiendo el paso del aceite que retorna al tanque.

### **Filtro de drenaje**

Es un interruptor diferencial con contactos normalmente cerrados. Abre los contactos para indicar cuando se encuentra sucio u obstruido el filtro impidiendo el paso del aceite de drenaje.

### **Filtro flushing**

Es un interruptor diferencial con contactos normalmente cerrados. Abre los contactos para indicar cuando se encuentra sucio u obstruido el filtro impidiendo el paso del aceite de flushing.

### **Válvula de succión**

Es un interruptor de límite con contactos normalmente cerrados. Con los contactos cerrados indica que la succión de la bomba hidráulica esta abierta, abre los contactos para indicar que se encuentra cerrada la succión de la bomba hidráulica.

### **Baja presión de carga**

Es un interruptor de presión con contactos normalmente cerrados. Abre para indicar al sistema cuando la carga ha llegado a niveles muy bajos para la operación correcta de la bomba.

### **Presión actual de la bomba 1**

Es una señal analógica de 4 – 20 mA correspondiente a la presión actual de la bomba hidráulica, proveniente de un transmisor de presión.

### **Válvula proporcional**

Es una señal configurable y manejada por la unidad procesadora local. Se encarga de regular el flujo de descarga de aceite en la bomba.

### **Válvula agua de enfriamiento**

Es una señal de 24 voltios proveniente de la unidad procesadora local. Que dependiendo del nivel de la temperatura en el aceite activa un relé que funge como interruptor para abrir o cerrar la electro válvula del agua de enfriamiento.

### **b) Señales de *encoder*, paro y arranque del motor eléctrico**

Son señales de sensores ubicados fuera de la unidad de potencia .

## **Encoder**

Es una señal analógica de 4 – 20 mA que corresponde 0 – 10 rpm, proveniente del encoder ubicado en el motor hidráulico acoplado al eje del motor.

## **Motor eléctrico encendido**

Señal proveniente de un contactor auxiliar del arrancador del motor eléctrico. Esta señal se utiliza para saber el estado del motor eléctrico. Cuando los contactos del contactor están cerrados indica que el motor eléctrico está encendido, si los contactos están abiertos indica que el motor eléctrico está parado o no ha encendido.

## **Relé paro por alarma**

Señal de 24 voltios proveniente de la unidad procesadora local, que energiza la bobina del relé, el cual funge como interruptor para energizar o desenergizar la bobina del arrancador del motor eléctrico cuando se produce una alarma. Cuando se produce una alarma el relé abre los contactos y el motor eléctrico para.

### **c) Señales de comunicación entre unidad procesadora local y unidad procesadora remota**

Cuando se opera en modo remoto, la unidad procesadora local quien es la que controla y monitorea los sensores de la unidad de potencia, debe actualizar el estado de estas señales a la unidad procesadora remota, y lo hace a través de las siguientes señales.

**Alarma colectiva.** Contacto seco normalmente abierto. Cuando la unidad procesadora local detecta una alarma (por máxima temperatura, mínimo nivel de aceite, alta presión de descarga, etc.) cierra los contactos para indicarle a la unidad procesadora remota que existe una alarma.

#### **Precaución colectiva**

Contacto seco normalmente abierto. Cuando la unidad procesadora local detecta un aviso de precaución (por alta temperatura, bajo nivel de aceite, presión de descarga, etc.) cierra los contactos para indicarle a la unidad procesadora remota que existe un aviso de precaución.

#### **Listo para usar**

Es un contacto seco normalmente abierto. Cuando se ha alcanzado la estabilidad en el arranque del motor hidráulico, este contacto cierra para indicar que el motor hidráulico está listo para operar.

#### **Motor hidráulico encendido**

Contacto seco normalmente abierto. Los contactos cierran cuando el motor eléctrico ha encendido. Si hay alguna variable fuera de los límites no permitirá iniciar la operación aun con el motor eléctrico encendido.

#### **Modo remoto activo**

Contacto seco normalmente abierto. Este contacto cierra para indicarle a la unidad procesadora remota que se ha elegido el modo remoto y que tome el control, o bien si los contactos abren le indica que se ha elegido el modo local y que esta tomará el control.

**Mando de velocidad remota**

Señal analógica de 4 – 20 mA proporcional a 0 – 10 rpm. Señal proveniente de la unidad procesadora remota que le indica a la unidad procesadora local el valor de la velocidad a regular en el motor hidráulico.

**Velocidad actual**

Señal analógica de 4 – 20 mA proporcional a 0 – 10 rpm. Señal proveniente del encoder instalado en el motor hidráulico, que la unidad procesadora local actualiza a la unidad procesadora remota.

**Presión actual**

Señal analógica de 4 – 20 mA proporcional a la presión actual en la bomba hidráulica. Señal proveniente del transmisor de presión, que la unidad procesadora local actualiza a la unidad procesadora remota.

**Paro de emergencia.**

Contacto normalmente cerrado, abre para generar un paro de emergencia. Esta señal es generada por el operador debido a una condición anormal, el paro, dispara el motor eléctrico y bloquea el movimiento del motor hidráulico. Señal proveniente de la unidad procesadora remota e independiente del modo (local o remoto) de trabajo.

**Arranque/paro del motor hidráulico**

Contacto que se utiliza para encender o parar el motor hidráulico en el modo remoto. Señal proveniente de la unidad procesadora remota. Cierra los contactos para arrancar el motor hidráulico y abre los contactos para detenerlo.

## **Pulgada en reversa**

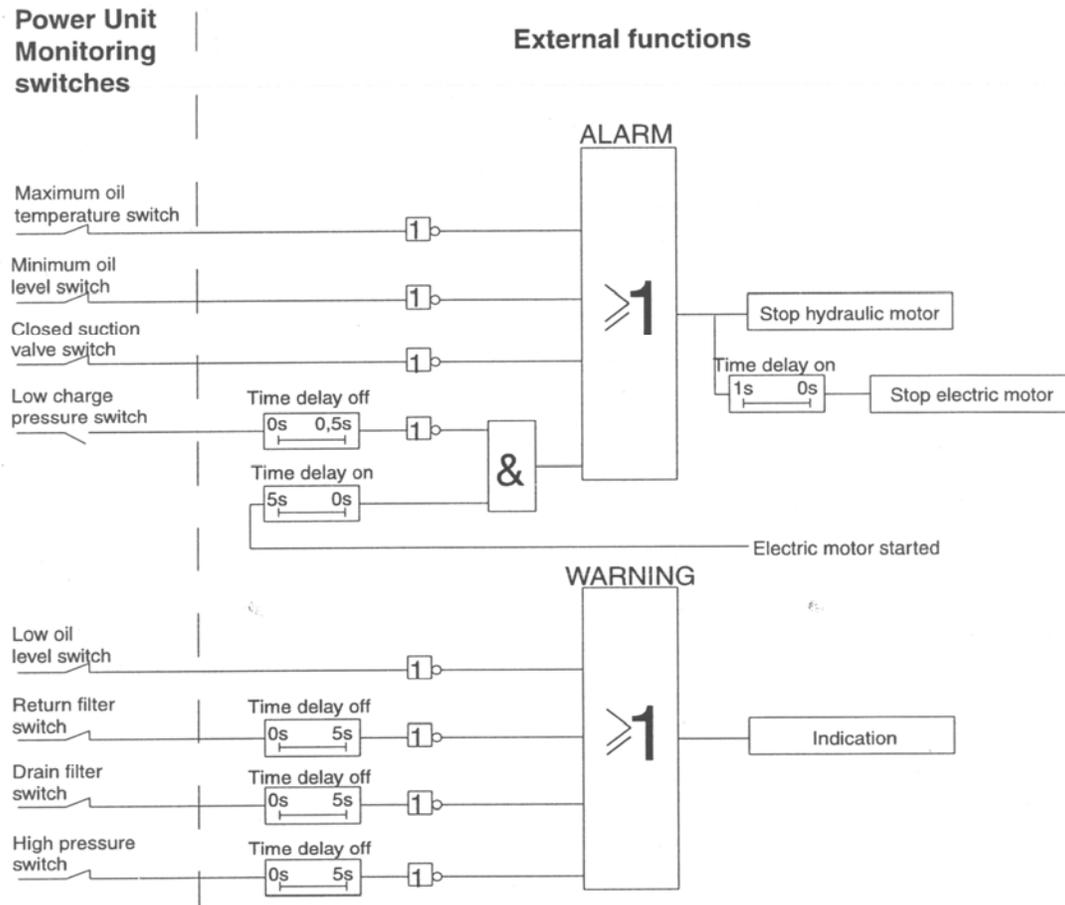
Contacto normalmente abierto. Cuando los contactos cierran el motor hidráulico gira en reversa a una velocidad fija configurable, únicamente durante el tiempo que los contactos estén cerrados. Esta señal se utiliza cuando existe un paro del motor hidráulico debido a un bloqueo, para procurar desatorarlo.

### **2.2.3 Configuración / Parametrización**

Como cualquier sistema basado en un microprocesador para funcionar utiliza un programa que se encarga de manejar internamente al procesador. Regularmente el programa es mejorado y actualizado por el fabricante. La unidad procesadora local puede configurarse desde un teclado elemental de ocho botones en donde, por medio de una pantalla de dos líneas de texto, se selecciona cada una de las opciones de control. La elección de los parámetros se hace usando los siguientes botones: >(SEL), <(ESC), ^ y v. Después de realizar algún cambio se acepta con la tecla >(SEL). Los parámetros son actualizados en memoria cuando se regresa al estado principal de la pantalla. En el diagrama 1 del anexo, se muestra el árbol de los parámetros configurables.

El sistema viene con una configuración básica de seguridad, que le permite realizar paros por alarmas, tanto para el motor hidráulico como para el motor eléctrico, y dar avisos de precaución. Esta configuración se conoce como: función de monitoreo. La función básica de monitoreo se muestra en el diagrama lógico de la figura 23. Pero se pueden agregar señales de otros dispositivos, para tomarlos en cuenta tanto en las Alarmas como en los avisos de Precaución, al configurar los parámetros de las letras M, N, P, R y S. Observar el árbol de parámetros en el diagrama 1 del anexo.

**Figura 23. Diagrama lógico de la función de monitoreo**



Fuente: Catálogo **Hagglunds Drives, installation and maintenance**, P. 9.

### 2.2.4 Configuración del *software*

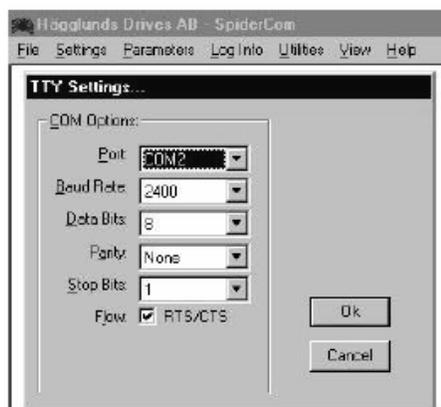
SpiderCom es un programa *Windows* para comunicación con el sistema de control local *Spider*. Este es usado para:

- Descargar y convertir archivos de datos.
- Descargar, editar y cargar los parámetros de configuración del sistema de control local *Spider*.

El programa requiere de una PC con un puerto serial estándar y Windows 95, 98 o NT4. La versión del *Spider* o sistema de control puede ser v3.0.0 o posterior y que este equipado con una tarjeta de memoria separada (unidad estándar con tarjeta principal rev.C) para tener la función completa.

**Ajuste del software.** Para realizar la configuración del puerto serial ir al menú principal bajo “ajustes” (*settings*). La figura 24 muestra la caja de dialogo y los ajustes que deben realizarse.

**Figura 24. Configuración del puerto serial**

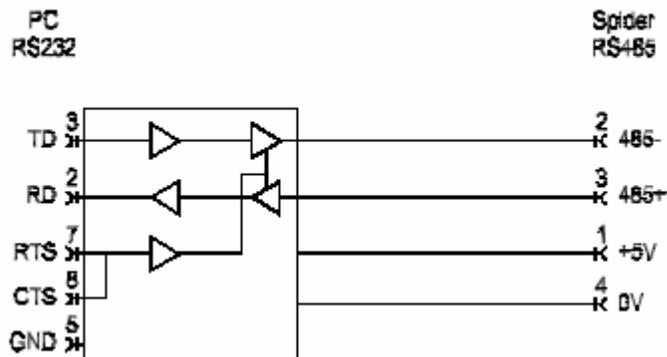


Puerto: puerto en uso  
Velocidad: 2400  
Bits de datos: 8  
Paridad: ninguna  
Bits de parada: 1  
Flujo: RTS/CTS

Fuente: Documentation for Spider control system, P. 22.

La conexión entre la PC y la unidad de control *Spider* se efectúa con un cable de comunicación provisto por el fabricante del equipo. El cable tiene un conector hembra DB-9 para conexión al puerto serial de la PC y un conector especial hembra de 4 pines para conexión con la unidad de control, el diagrama de este se muestra en la figura 25.

**Figura 25. Diagrama del cable de comunicación**



Fuente: **Documentation for Spider control system**, P. 25.

En el menú principal bajo “utilidades” existe la opción para prueba de la comunicación (*Test Comunication*). Prueba la línea de comunicación entre la PC y la unidad de control *Spider*.

**Recibiendo datos.** Para descargar los datos de parámetros y archivos log de la unidad procesadora hacia la PC, es necesario que la unidad procesador y la PC estén comunicados por medio del cable y ejecutar el programa *SpiderCom*. En el menú principal bajo “*log info*” seleccionar “recibir” (*receive*), automáticamente se abre una caja de dialogo en la que hay que llenar la descripción del sistema, que puede ser el nombre del cliente; y la del usuario, que puede ser el nombre del departamento. Posteriormente seleccionar la localidad en el disco duro donde uno quiera guardar el archivo (.dmp) descargable.

**Editar parámetros.** Esta opción permite hacer modificaciones a la configuración y a los parámetros de la unidad procesadora desde la computadora, editando los valores del archivo anteriormente descargado, posteriormente se graba el archivo para que quede registro de los cambios y se transmiten los datos o nueva configuración, hacia la unidad procesadora.

En el menú principal bajo “*parámetros*” (*parameters*), seleccionar “editar” (*edit*), automáticamente se abrirá una caja de dialogo donde se debe elegir la localidad y el archivo (.dmp) a abrir para editar. Este puede ser un archivo descargable log recibido desde la unidad *Spider*, o un archivo grabado desde un proyecto con anterioridad.

Luego de abrir el archivo, aparece una caja de diálogo con las siguientes opciones:

**Editar *drive 1*** – Edición de los parámetros específicos para el *drive 1*.

**Editar *drive 2*** – Edición de los parámetros específicos para el *drive 2*.

**Editar ambos *drives*** – Edición de los parámetros comunes de ambos *drives*.

**Valores desde el archivo** – Inicia desde el archivo grabado.

**Valores por defecto** – Restaura todos los valores por defecto.

**Imprimir** – Imprime la lista de parámetros a la impresora por defecto.

**Guardar** – Guarda la lista de cambios.

**Guardar como** – Guarda la lista de parámetros bajo un nombre distinto o lugar distinto.

**Cancelar** – Sale sin guardar.

**Transmisión de datos.** Después de efectuar cambios a un archivo de datos, se tiene la posibilidad de transmitirlos o cargarlos de nuevo a la unidad procesadora, para que opere con la nueva configuración editada en el archivo.

Es necesario que la unidad procesador y la PC estén comunicados por medio del cable. En el menú principal bajo “parámetros” (*parameters*) seleccionar “transmitir” (*transmit*), automáticamente aparecerá una caja de diálogo que le pide ingresar una palabra clave (*password*), teclee el *password* para acceder a transmitir. Seleccionar el archivo (.dmp) a transmitir a la unidad procesadora. Los parámetros son grabados a la tarjeta de memoria de la unidad procesadora y se necesita reiniciarla para que estos cambios tengan efecto.

**Conversión de datos.** Se dispone de la posibilidad de convertir un archivo de datos descargado al formato de una hoja excel, para poder darle cualquier otro tratamiento ya sea de presentación al imprimir, o de elegir solo ciertos datos para llevar un registro. En el menú principal bajo utilidades, elegir convertir a formato excel, automáticamente se abre una caja de dialogo donde se debe elegir el archivo (.dmp) a convertir y la localidad donde se desee grabar el archivo convertido. De esta manera el nuevo archivo convertido esta disponible en formato excel.

### **2.2.5 Protocolo de comunicación**

El cable utilizado para la comunicación entre la PC y el controlador local *Spider* incluye internamente una unidad convertidora para los protocolos de comunicación RS232 y RS485. La unidad entrega 2 líneas aisladas galvánicamente, llamadas 485+ y 485- (ver figura 25).

En el protocolo RS485, estas líneas funcionan como par diferencial (sin tierra absoluta como el RS232). El 1 lógico se representa por la condición en que el voltaje en la línea 485+, es mayor que el de la línea 485-, y al revés para el 0 lógico. Típicamente  $(485+) - (485-) = 5$  volts para 1 lógico y  $(485+) - (485-) = -5$  volts para 0 lógico. Porque el protocolo RS-485 es "bidireccional *Half Duplex*", esta unidad controla la transmisión con las líneas de control, RTS y CTS (ver figura 25), del puerto RS232. En este caso, cuando la línea RTS está en voltaje positivo, comunicación procede de RS-232 a RS-485. Cuando la línea CTS está en voltaje positivo, la comunicación se permite de RS-485 a RS-232.

### **2.2.6 Data Logger**

Para disponer de esta opción el sistema debe estar equipado con la tarjeta de memoria que viene por separado. El *data logger* o adquisición de datos permite llevar un registro de los siguientes eventos:

- Lista de alarmas
- Lista de avisos de precaución
- Contadores de tiempo

**Alarmas y avisos.** Ya que la unidad tiene la posibilidad de manejar dos bombas esta información esta disponible para cada una.

Esta información debe ser descarga a la PC para examinarla, y viene incluida en los archivos de datos.

La lista de alarmas es encontrada en el menú bajo LOG READINGS – DRIVE1 – ALARM y LOG READINGS – DRIVE2 – ALARM, (ver el diagrama 1 del anexo).

La lista de avisos de Precaución es encontrada en el menú bajo LOG READINGS – DRIVE1 – WARNING y LOG READINGS – DRIVE2 – WARNING, (ver el diagrama 1 del anexo).

Las cuatro listas son 10 alarmas o avisos. La ultima alarma o más reciente es la superior, y cuando una nueva alarma o aviso ocurre la más antigua es removida. Las alarmas y avisos son marcados con la fecha y hora en que ocurrieron.

Los contadores de tiempo son encontrados en el menú bajo LOG READINGS – DRIVE 1 – TIME IN USE y LOG READINGS – DRIVE 2 – TIME IN USE, (ver diagrama 1 del anexo). Los contadores pueden ser reiniciables. Los ajustes del reloj, el monitoreo y el reinicio se hacen en SETUP – LOG FUNCTION y son protegidos por un *password*. En la opción TIME/DATE se ajusta la fecha y la hora, y el formato es YYMMDD HH:MM , que se utiliza para la lista de Alarmas, Avisos y Contadores de tiempo.

**Contadores de tiempo.** Hay cuatro contadores denominados LOG1 a LOG4 que tienen por finalidad el utilizarse como registros o canales para monitorear una variable en especial, específicamente variables conectadas a señales analógicas (entradas o salidas), como la velocidad y la presión de trabajo. Deben configurarse cada una por separado para determinar la variable a monitorear y el periodo de tiempo.

Cada canal consiste de un área de medición dividida en 6 niveles. La medición es únicamente activada cuando arranca la bomba hidráulica. El tiempo total de medición es de 100,000 horas.

Los parámetros a configurar en cada canal son:

STA – Activar o desactivar la función LOG.

MT – Periodo de tiempo de medición. Puede ser desde 1 hasta 5000 horas.

LHI – Ajusta el valor del nivel 6. Puede ser desde -100 hasta 7250.

LLO – Ajusta el valor del nivel 1. Puede ser desde -100 hasta 7250.

REG – El registro elegido indica que variable será monitoreada.

A continuación se muestra una tabla de los registros disponibles y a que variable están relacionados.

**Tabla I. Registros disponibles para configuración de los canales**

REG 100 =	Mando de entrada (%)
REG 101 =	Corriente de salida (mA)
REG 102 =	Velocidad digital (rpm, m/m, m/s, f/m, f/s)
REG 103 =	Limitación de potencia (A, kW, hp, bar, psi, MPa, °C, °F)
REG 104 =	Velocidad analógica (rpm, m/n, m/s, f/m, f/s)
REG 105 =	Ajuste de velocidad (% actual)
REG 106 =	Presión de trabajo (modo shredder, bar, psi, MPa, A, kW)
REG 107 =	Mando de alimentación hacia delante (%)
REG 108 =	Señal de error (%)
REG 109 =	Mando de amplificación (%)
REG 110 =	Ángulo de inclinación actual (%)
REG 111 =	Ángulo de inclinación actual (%)
REG 112 =	Comando de alimentación hacia delante (rpm)
REG 113 =	Retroalimentación de velocidad (%)

Fuente: Documentation for spider control system, P. 16(17).

### **2.3 Controlador remoto**

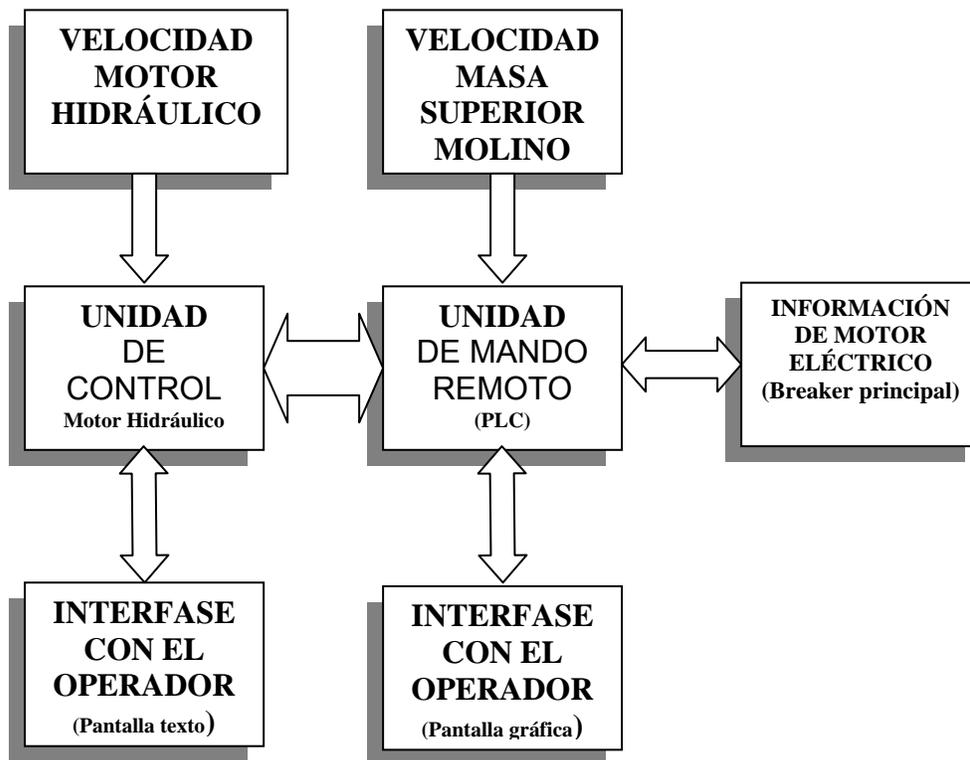
La unidad de control local puede operar perfectamente el motor hidráulico, pero, debido a la aplicación especial en molinos es necesario tener una segunda unidad de control que en este caso es la unidad de control remoto. Como ya se mencionó el motor hidráulico se utiliza específicamente para mover la maza cañera, esta masa debe girar de manera sincronizada y proporcionalmente a la masa superior, por tanto es necesario conocer la velocidad de la masa superior, y para ello se dispone de un encoder de velocidad conectado a esta masa, para obtener una señal que pueda ser operada por el controlador remoto al multiplicarla por el valor de relación, para dar como resultado una señal que le indique al controlador local a que velocidad debe llevar al motor hidráulico. De esta forma, al estar detenida la masa superior también lo debe estar la cañera, y al empezar a moverse la masa superior también lo debe hacer la cañera y mantener su velocidad por arriba o por debajo según se haya asignado la proporción. También se puede conseguir que la masa cañera gire independientemente de la maza superior cuando se requiera en casos especiales.

Cuando el controlador local se pone a trabajar en modo remoto se delega completamente el control a la unidad remota, actualizándolo constantemente de toda la información necesaria para el control y monitoreo. Dicho de otra forma, el motor hidráulico puede ser operado y monitoreado desde la unidad remota.

### 2.3.1 Diagrama a bloques

En la figura 26, se muestra la relación que existe en el control del motor hidráulico, entre la unidad remota y la unidad local.

**Figura 26. Estructura básica del sistema de control**



Fuente: [www.hagglunds.com](http://www.hagglunds.com)

### **2.3.2 Controlador PLC**

La unidad hidrostática puede trabajar individualmente y manipulada por un operador que conozca el proceso. Sin embargo, existen en la aplicación condiciones que pueden cambiar muy rápido y es imposible que el operador pueda realizar correcciones. Para este caso la integración de los controles hace que se requieran equipos de automatización.

La unidad procesadora de control remoto esta integrada por un controlador lógico programable (PLC). Usualmente se realizan cableados directamente de borne a borne previamente definidos, además se instalan pantallas industriales que sirven para observar la operación instantáneamente.

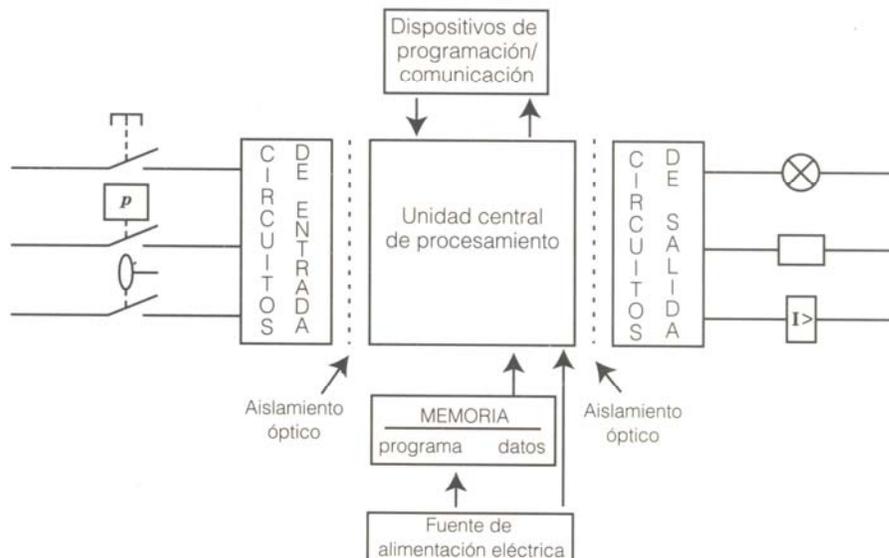
#### **2.3.2.1 Hardware**

Básicamente el *hardware* esta formado por el controlador lógico programable (PLC) *MELSEC FX-64MR* de *Mitsubishi*, y su estructura se muestra en la figura 27, que consta de:

- Módulos de entrada
  - Analógicos
  - Digitales
  
- Módulos de salida
  - Analógicos
  - Digitales

- Unidad central de procesamiento (CPU)
- Memoria, para almacenamiento de los programas y datos
- Fuente de alimentación eléctrica
- Dispositivo de programación y comunicación

**Figura 27. Estructura del PLC**



### 2.3.2.2 Software

Melsec Medoc es un programa D.O.S. distribuido por *Mitsubishi Electric Corporation* para comunicación entre una PC y el controlador lógico programable (PLC).

Este *software* permite a los usuarios crear, editar, documentar, almacenar, localizar y corregir problemas, generar informes impresos, así como programar el PLC en lista de instrucciones o en diagrama de escalera.

Las siguientes interfaces son requeridas para transferir datos desde *Melsec Medoc* a varios sistemas PLC de *Mitsubishi Electric*:

- De la computadora, interfase RS-232
- Del sistema PLC, interfase RS-422
- Para la conexión de las interfases RS-232 y RS-422, las unidades de conversión SC-02N, SC-05 o SC-08.
- Cable FX-422CAB provisto por el fabricante del sistema PLC

Para comunicación entre la computadora y el sistema PLC se pueden usar cualquiera de los dos primeros puertos seriales, COM1 o COM2

### **2.3.3 Interfase de operación**

Como interfase se conoce al límite donde se da el contacto humano (operador) con la unidad de control. Físicamente puede ser una pantalla o un teclado o ambos que mantienen al operador enterado de los parámetros de operación remota. Para este caso la interfase remota esta formada tanto de pantalla como de teclado.

A diferencia de la pantalla de texto para el procesador local, en el procesador remoto la pantalla es gráfica y a color.

Específicamente la interfase remota esta compuesta por: pantalla gráfica a color, botones con funciones predefinidas, LED's indicadores y teclado numérico. En la figura 28, se aprecia la interfase de la unidad de control remota.

**Figura 28. Interfase remota con el operador**



Fuente: **Hagglunds** Documentation for Electronic cubicle HU1 3872, P. 15.

El operador por medio de los botones con funciones predefinidas y teclado numérico puede acceder a los menús y submenús disponibles para poder configurar y monitorear el sistema. En la interfase con el fin de proteger la transmisión y la operación se proveen grupos de niveles de acceso codificados (uso de *password*) para poder acceder a la configuración.

### 2.3.4 Comunicaciones

Las comunicaciones están basadas en enlazamientos y alarmas colectivas para el control interno, y otros dispositivos para el control externo. El término enlazamiento se refiere al enlace de señales desde el *spider* hasta la unidad remota, el *spider* manda a hacer algo y la unidad lo ejecuta y confirma la ejecución. Los enlazamientos se utilizan en el sistema en las dos fuentes de generación de alarmas. La primera es la de unidad de control local y la otra es el mando remoto. A cada fuente llegan cables de conexión con señales que las mantienen bajo supervisión. La unidad de control local cuenta con una pantalla de texto que muestra las alarmas o precauciones que son locales en la transmisión, bajo nivel de aceite, alta temperatura de aceite, alta presión de descarga, etc. La segunda, el mando remoto, cuenta con una pantalla gráfica en la cual presenta cada uno de los eventos clasificados por hora. Entre los textos que presenta están: paro de emergencia activado, falla de arranque en motor eléctrico, falla de fuente de poder, falla colectiva del motor, etc.

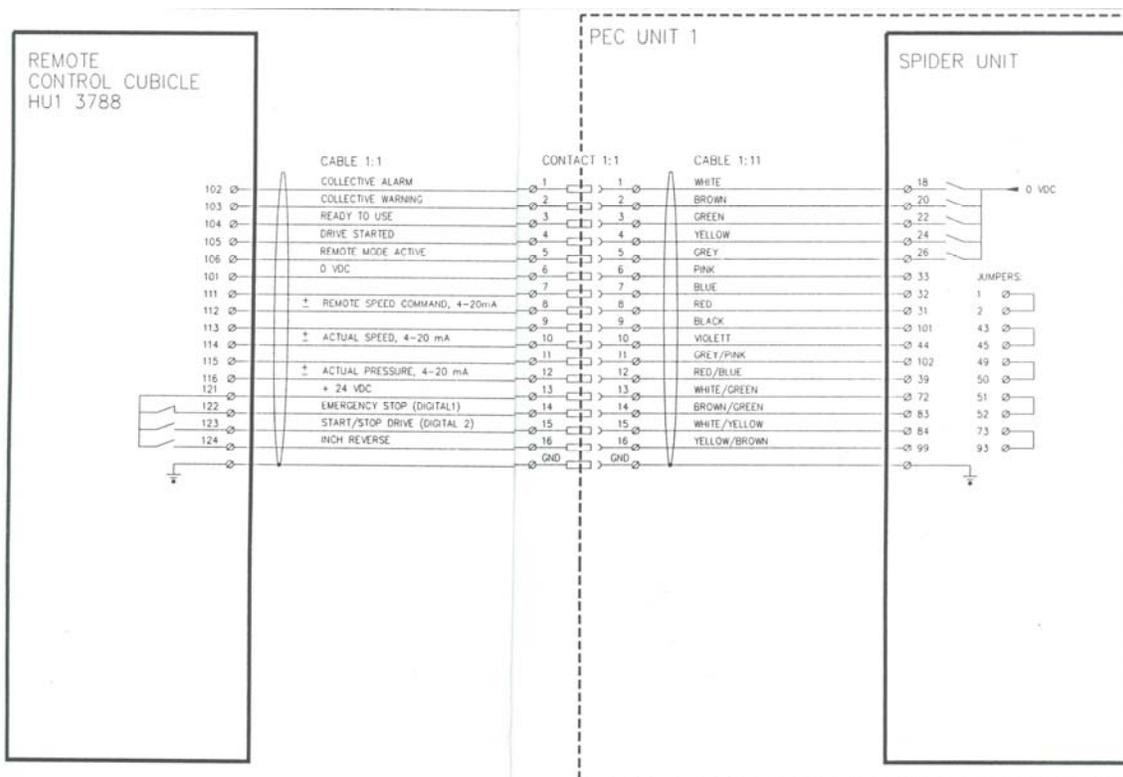
En las alarmas obtenidas en la unidad de mando remoto, existe un término utilizado para indicar que esta llegando de la unidad de control local, y es: alarma colectiva, que significa que debe limpiarse localmente, y al mando remoto únicamente se le confirmará automáticamente que ya se realizó la limpieza.

Una alarma colectiva puede ser producida por varias causas, bajo nivel de aceite, alta temperatura de aceite, alta presión de descarga, etc. El mando remoto ante una alarma colectiva, únicamente sirve para informar al operador que debe ir a verificar localmente el sistema. Las alarmas pueden ser identificadas por el operador y atendidas con facilidad, debido a que su descripción es claramente expuesta con textos.

Por la forma en que actúan sobre el sistema existen dos clasificaciones: alarma y precaución.

En el caso de las alarmas, el efecto producido inmediatamente es el disparo del motor hidráulico y el motor eléctrico, en ese orden. La precaución, se configura con un tiempo de retardo, generalmente de diez segundos, y transcurrido ese tiempo de precaución activada, se da un paro general. La figura 29, muestra los enlazamientos de comunicación entre la unidad local y la unidad remota.

**Figura 29. Diagrama a bloques que representa la comunicación de enlazamientos y alarmas colectivas para control interno entre las unidades de control**



Fuente: **Documentation** for Electronic cubicle HU1 3872, external connection diagram, sheet 2.

Entre otros dispositivos de comunicación para el control externo se tienen los siguientes:

**Entradas:**

**Comando de velocidad.** Conectado a un señal analógica. 4 – 20 mA correspondiente a 0 – 10 rpm. Puede ser la velocidad del molino.

**Parada de emergencia.** Conectado a un contacto seco normalmente cerrado. La parada de emergencia será activada si el contacto es abierto.

**Encender / parar motor eléctrico.** Conectado a un contacto seco normalmente abierto. El motor eléctrico arrancará cuando el contacto se cierre. El motor eléctrico parará cuando el contacto se abra.

**Encender / parar la bomba.** Conectado a un contacto normalmente abierto. La bomba encenderá cuando el contacto cierre. La bomba parará cuando el contacto se abra.

**Arranque del seguidor del molino.** Conectado a un contacto seco normalmente abierto que cierra cuando el molino ha arrancado. Esta es una entrada de interlock con el arranque de la bomba. La bomba para si el contacto abre. Hacer un corto entre terminales si no es usado.

**Adicional interlock.** Conectado a un contacto normalmente abierto, que cierra cuando la bomba ha permitido arrancar. Esta es una entrada de interlock con el arranque de la bomba. La bomba para si el contacto abre. Hacer un corto entre terminales si no es usado.

## **Salidas :**

**Señal de monitoreo.** Señal analógica de 4 – 20 mA correspondiente al rango elegido. Las elecciones son: comando de velocidad externa, velocidad actual, presión actual y comando de velocidad interna.

**Paro de emergencia.** Contacto normalmente cerrado que abre cuando es activado el paro de emergencia.

**Alarma colectiva.** Contacto normalmente abierto que cierra cuando es activada la alarma.

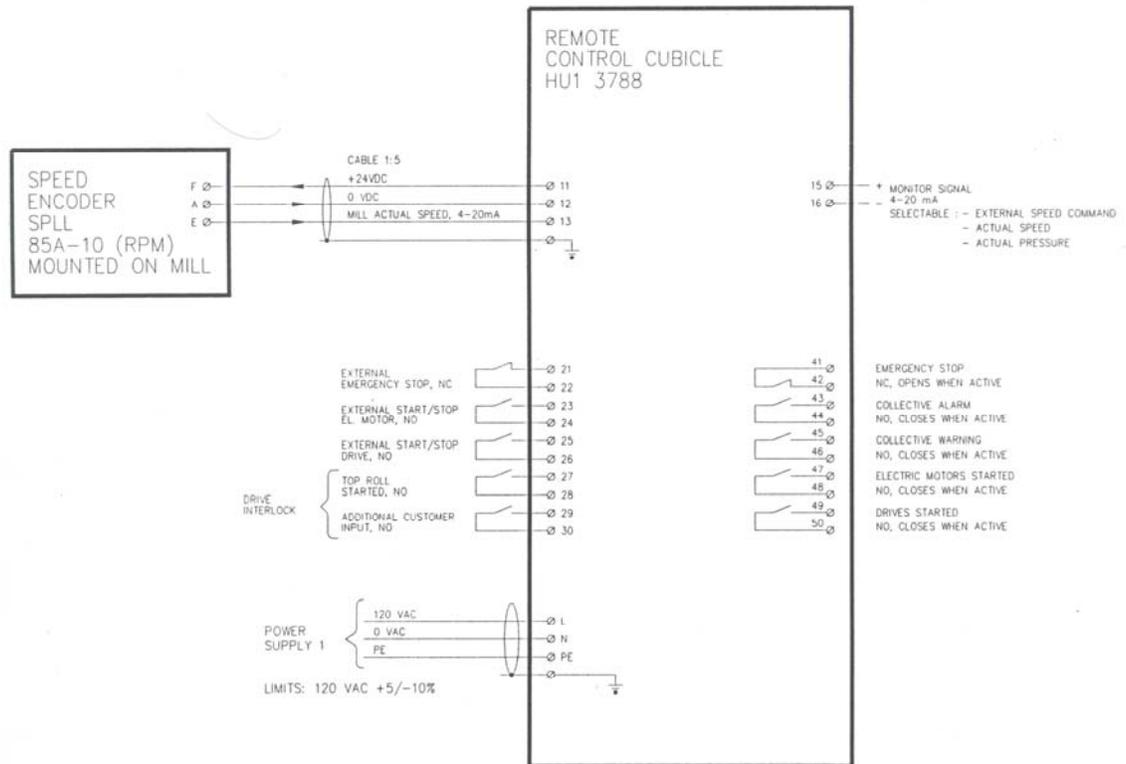
**Avisos de precaución colectivos.** Contacto normalmente abierto que cierra cuando es activado un aviso de precaución.

**Motor eléctrico encendido.** Contacto normalmente abierto que cierra cuando el motor eléctrico ha encendido.

**Bomba encendida.** Contacto normalmente abierto que cierra cuando la bomba ha encendido.

En la figura 30, se muestra un diagrama a bloques que representa la comunicación de la unidad remota con dispositivos externos.

**Figura 30. Diagrama a bloques que representa la unidad procesadora remota para el control externo**



Fuente: **Documentation** for Electronic cubicle HU1 3872, external connetion diagram, sheet 1.

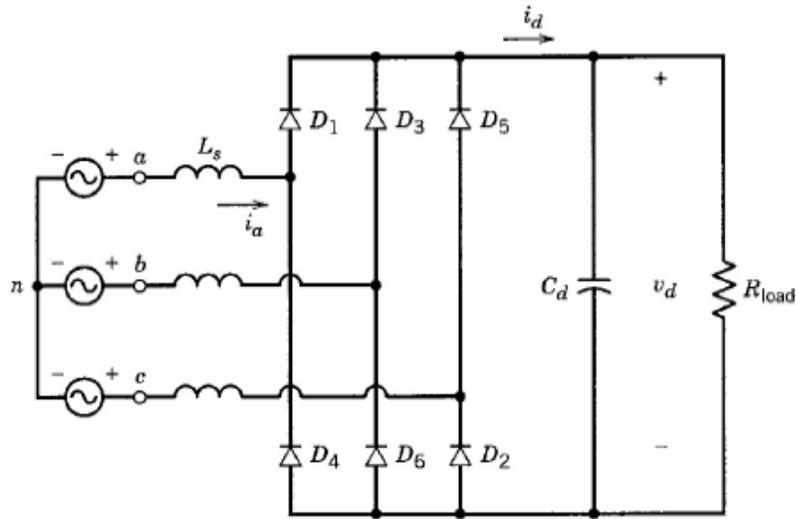
### 3. SISTEMAS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS EN MOTORES AC DE MEDIANA TENSIÓN DE ALTO CABALLAJE Y TORQUE CONSTANTE

#### 3.1 Teoría de rectificación trifásica

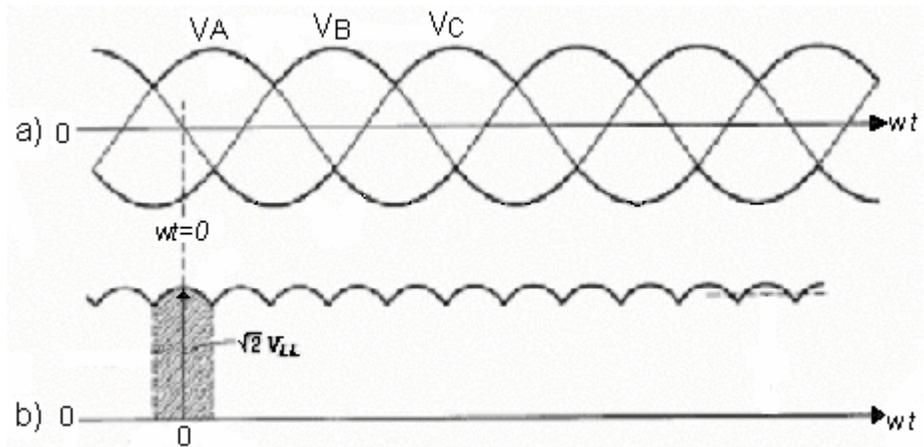
En el mundo industrial hay aplicaciones en las que se requiere una fuente de alimentación de corriente continua a partir de la red eléctrica alterna trifásica. Los circuitos encargados de realizar esta conversión son los llamados rectificadores. Se pueden distinguir dos tipos: rectificadores controlados y rectificadores no controlados.

**Rectificadores no controlados.** Están formados exclusivamente por diodos. Los semiconductores van entrando en corte y conducción de una forma natural, debido a las tensiones de entrada. La relación entre la tensión continua de salida y el valor eficaz de la señal de entrada se mantiene pues constante. Las ventajas de estos circuitos son su sencillez y fiabilidad, ya que no necesitan circuitos adicionales de control y mando. Las limitaciones de estos rectificadores son que trabajan solamente en el primer cuadrante y proporcionan un gran contenido de armónicos a la corriente de línea de la red trifásica, en la figura 31 se muestra el diagrama eléctrico de un rectificador trifásico no controlado y las señales de: a) tensión de entrada, b) tensión de salida.

Figura 31. Rectificador trifásico no controlado y sus señales de tensión



Señales de tensión a) entrada, b) salida



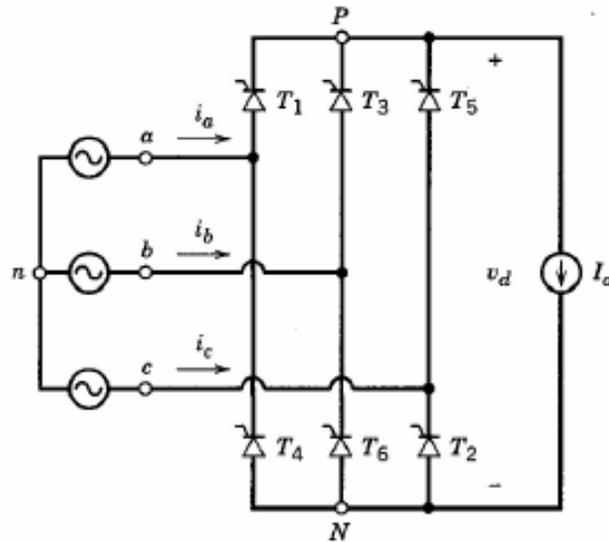
**Rectificadores controlados.** Están formados por tiristores. Estos entran en conducción de forma controlada y salen de ésta de forma controlada o bien de modo natural cuando la corriente en ellos pasa por cero.

En estos rectificadores la tensión de salida puede controlarse y tomar valores positivos o negativos, es decir, estos convertidores pueden trabajar en dos cuadrantes. Un inconveniente de este tipo de rectificadores es que necesitan circuitos específicos de disparo para los tiristores, lo que les hace más complejos.

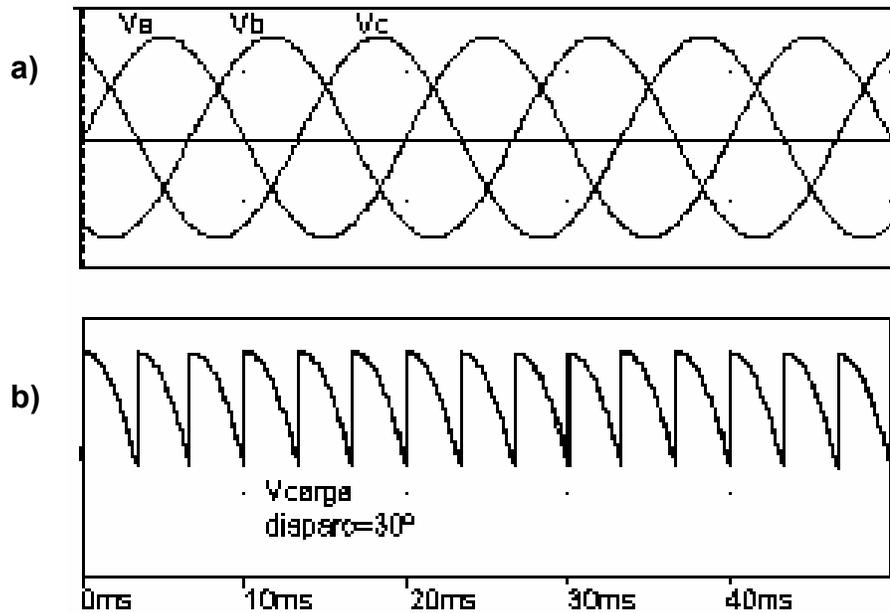
Con este tipo de rectificadores es posible obtener una tensión continua variable. Además pueden operar de forma reversible, cediendo energía a la red, denominándose entonces, inversores no autónomos. Su elemento de base es el tiristor y el control de éste se efectúa retardando su disparo un tiempo  $\alpha/\omega$  a partir del instante que la tensión ánodo-cátodo se hace positiva.

El rectificador a tiristores hace uso de la técnica de control de fase mediante la cual, para obtener el deseado valor de tensión continua, se emplea solamente una porción de la onda alterna aplicada al puente rectificador. Esta es una de sus principales ventajas, ya que de esta forma, es posible conseguir, tanto una estabilidad en la tensión de salida de cc frente a variaciones de la tensión de red y carga, como cualquier otra característica tal como limitación de intensidad de salida o de la intensidad que circula por cualquier rama del circuito de cc. Como la tensión continua de salida es función de la tensión alterna aplicada y del ángulo de disparo de los tiristores o, dicho de otro modo, de la porción de onda aprovechada, basta regular el ángulo de disparo  $\alpha$  para compensar las variaciones de tensión aplicada al puente o producidas por la propia regulación del transformador. En la figura 32, se muestra el circuito eléctrico de un rectificador trifásico controlado y sus señales de tensión.

Figura 32. Rectificador trifásico controlado y sus señales de tensión



a) Tensión de entrada trifásica. b) tensión de salida rectificada con  $\alpha = 30^\circ$



### 3.2 Dispositivos electrónicos de potencia para mediana tensión

Los dispositivos electrónicos de potencia generalmente son utilizados para modificar las características de la energía eléctrica, principalmente su tensión y frecuencia. Son estudiados por electrónica de potencia, esta rama de la electrónica no es reciente, aunque se puede decir que su desarrollo más espectacular se produjo a partir de la aparición de los elementos semiconductores, y más concretamente a partir de 1957, cuando Siemens comenzó a utilizar diodos semiconductores en sus rectificadores.

El elemento que marca un antes y un después es sin duda el Tiristor (SCR), *Semiconductor Controlled Rectifier*, cuyo funcionamiento se puede asemejar a lo que sería un diodo controlable por puerta. A partir de aquí, la familia de los semiconductores crece rápidamente: Transistor Bipolar (BJT), *Bipolar Junction Transistor*; MOSFET de potencia; Tiristor bloqueable por puerta (GTO), *Gate turn-off Thyristor*; IGBT, *Insulate Gate Bipolar Transistor*; etc. gracias a los cuales, las aplicaciones de la electrónica de potencia se han multiplicado.

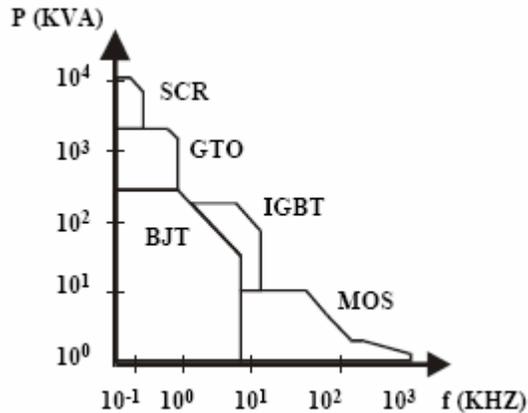
Una nueva dimensión de la electrónica de potencia aparece cuando el control de los elementos de potencia se realiza mediante la ayuda de sistemas digitales (microprocesadores, microcontroladores, etc). Esta combinación derivó en una nueva tecnología, que integra en un mismo dispositivo, elementos de control y elementos de potencia. Esta tecnología es conocida como *Smart - Power* y su aplicación en industria, automovilismo, telecomunicaciones, etc. tiene como principal límite la disipación de elevadas potencias en superficies semiconductoras cada vez más pequeñas.

El dispositivo básico de potencia debe cumplir los siguientes requisitos:

- Tener dos estados bien diferenciados, uno de alta impedancia (idealmente infinita), que caracteriza el estado de bloqueo y otro de baja impedancia (idealmente cero) que caracteriza el estado de conducción.
- Capacidad de soportar grandes intensidades con pequeñas caídas de tensión en estado de conducción y grandes tensiones con pequeñas corrientes de fugas cuando se encuentra en estado de alta impedancia o de bloqueo.
- Controlabilidad de paso de un estado a otro con relativa facilidad y poca disipación de potencia.
- Rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro y capacidad para poder trabajar a frecuencias considerables.

En la figura 33, se pueden observar las limitaciones de los distintos dispositivos semiconductores, en cuanto a potencia controlada y frecuencias de conmutación. Dispositivos que pueden controlar elevadas potencias, como el Tiristor ( $10^4$  KVA) están muy limitados por la frecuencia de conmutación (0.5 KHz), en el lado opuesto los MOSFETs pueden conmutar incluso a frecuencias de hasta  $10^3$  KHz pero la potencia apenas alcanza los 10 KVA, en la franja intermedia se encuentran los BJTs (300 KVA y 10KHz), los GTOs permiten una mayor frecuencia de conmutación que el Tiristor, 1 KHz con control de potencias de unos 2000 KVA, por último los IGBTs parecen ser los más ideales para aplicaciones que requieran tanto potencias como frecuencias intermedias.

**Figura 33. Características frecuencia – potencia conseguidas durante los años 90 para los distintos tipos de semiconductores de potencia**

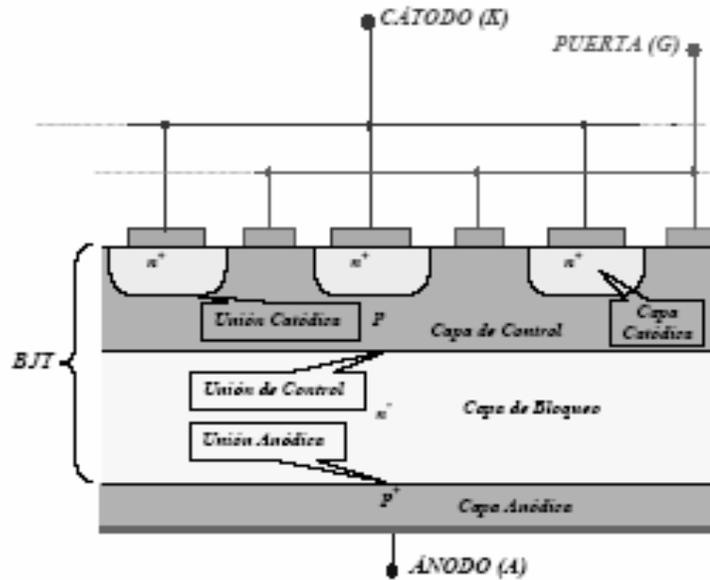


### 3.2.1 SCR

Aunque a toda la familia de semiconductores de cuatro capas se les llama tiristor, es al SCR al que normalmente se le aplica el nombre de tiristor. Siendo también el más usado y desarrollado.

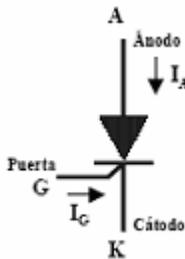
El SCR, *Silicon Controlled Rectifier* o Rectificador Controlado de Silicio, es un dispositivo semiconductor biestable formado por tres uniones PN con la disposición PNP. En la figura 34, se muestra la estructura del SCR.

**Figura 34. Estructura del SCR**



El SCR está formado por tres terminales, llamados Ánodo, Cátodo y Puerta, en la figura 35, se muestra su símbolo.

**Figura 35. Símbolo del SCR**



El instante de conmutación (paso de corte a conducción), puede ser controlado con toda precisión actuando sobre el terminal de puerta, por lo que es posible gobernar a voluntad el paso de intensidades por el elemento, lo que hace que el tiristor sea un componente idóneo en electrónica de potencia, ya que es un conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez.

El tiristor es un elemento unidireccional y sólo conduce corriente en el sentido ánodo–cátodo, siempre y cuando el elemento esté polarizado en sentido directo (tensión ánodo–cátodo positiva) y tenga aplicado un impulso en la puerta. Para el caso de que la polarización sea inversa, el elemento estará siempre bloqueado.

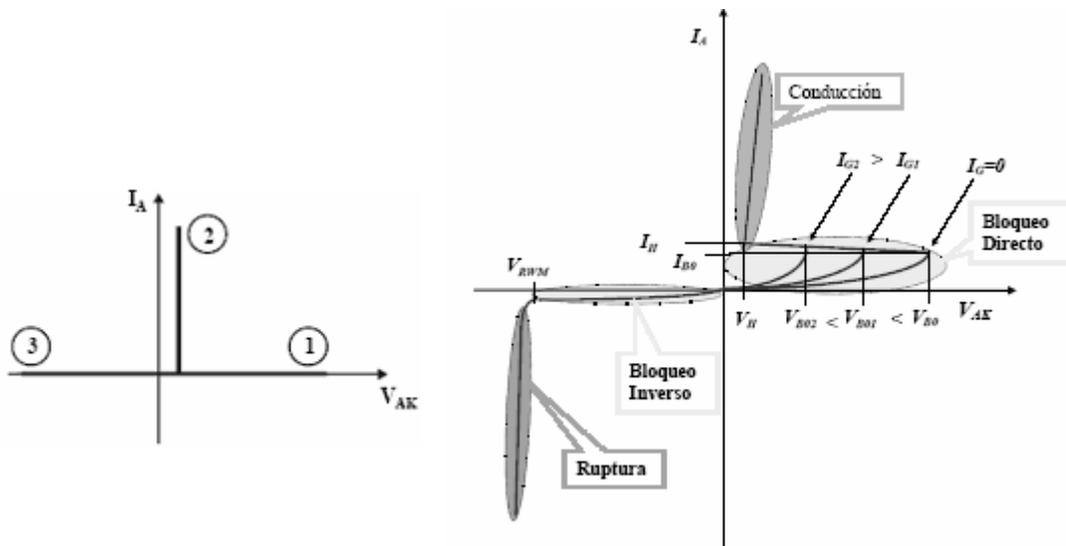
Las características eléctricas entre ánodo–cátodo dependerán de la señal que hay o ha habido en la puerta en el momento de polarización positiva, pudiendo comportarse como un cortocircuito o como un circuito abierto, de aquí su posible funcionamiento como conmutador.

En la curva característica del SCR, se pueden apreciar tres zonas. En la figura 36 se muestra la curva característica, en a) idealizada y en b) estática.

**Figura 36. Curva característica del SCR**

a) Ideal

b) Estática



**Zona 1.**  $V_{AK}$  positiva (ánodo con mayor potencial que cátodo). La  $I_A$  (intensidad de ánodo) puede seguir siendo nula. El dispositivo se comporta como un circuito abierto (se encuentra en estado de bloqueo directo).

**Zona 2.**  $V_{AK}$  positiva. En este instante se introduce una señal de mando por la puerta que hace que el dispositivo bascule del estado de bloqueo al estado de conducción, circulando una  $I_A$  por el dispositivo, intensidad que estará limitada sólo por el circuito exterior. El elemento está en estado de conducción. El paso de conducción a corte se hace polarizando la unión ánodo - cátodo en sentido inverso provocando que la intensidad principal que circula se haga menor que la corriente de mantenimiento ( $I_H$ ).

**Zona 3.**  $V_{AK}$  negativa. La  $I_A$  es nula, por lo que el dispositivo equivale a un circuito abierto, encontrándose en estado de bloqueo inverso.

El SCR es capaz de controlar 2000A, 4000V. La frecuencia de trabajo es de 50-60Hz (SCR de red) pudiendo trabajar con frecuencias de hasta 200KHz (SCR rápido). Se emplean en la rectificación controlada y en todas las técnicas de potencia que se emplean para modificar toda la representación de la energía eléctrica.

### 3.2.2 IGBT

El IGBT o Transistor Bipolar de Puerta Aislada “*Insulate Gate Bipolar Transistor*” es un dispositivos de conducción unidireccional que prenden por comando sostenido (tensión de base), muy adecuado para aplicaciones de media potencia, de 1 kW a 2 MW. El IGBT combina las ventajas de los BJT y los Mosfet. Tiene una impedancia de entrada elevada, como los Mosfet y bajas perdidas en conmutación, como los BJT, pero sin el problema de la segunda ruptura, por lo que puede trabajar a elevada frecuencia y con grandes intensidades.

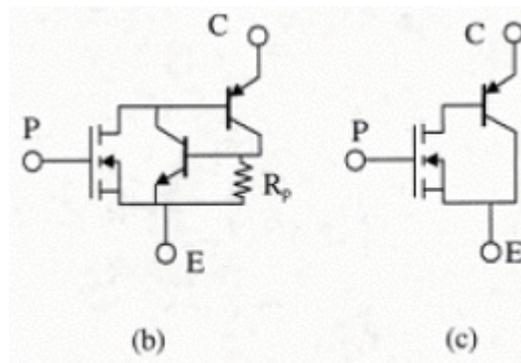
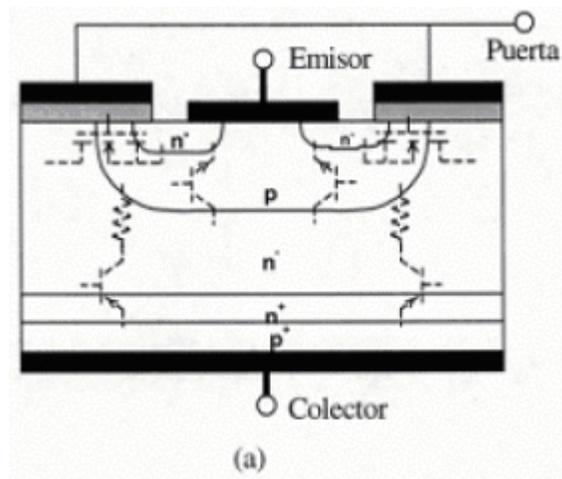
Los IGBT fueron desarrollados hace relativamente poco tiempo, pero su evolución ha sido rápida debido a que han demostrado tener una resistencia en conducción muy baja y una elevada velocidad de conmutación (la transición desde el estado de conducción al de bloqueo se puede considerar de unos dos microsegundos, y la frecuencia puede estar en el rango de los 50KHz), además de una elevada tensión de ruptura. En la figura 37, se muestran los símbolos del IGBT.

**Figura 37. Símbolos del IGBT**



**Estructura del IGBT.** El transistor bipolar de puerta aislada es un elemento semiconductor híbrido que puede verse como un MOSFET controlando a un BJT, con el fin de aprovechar las ventajas de ambos, como se muestra en la figura 38. El IGBT posee un electrodo aislado de control, como en el MOSFET y presenta una baja tensión de saturación como en el transistor bipolar

**Figura 38. Estructura del IGBT y circuitos equivalentes**



En la figura 38a, puede observarse cómo la estructura del IGBT es idéntica a la de un MOSFET a la cual se le ha añadido en el drenador (colector) una unión pn que inyecta portadores minoritarios en el canal cuando el IGBT conduce, lo que reduce considerablemente la tensión de saturación. Los IGBT actuales se fabrican mediante dos tecnologías diferentes, la PT (Punch Through) y la NPT (Non Punch Through). Los PT-IGBT se construyen con un sustrato de tres capas P+ N+ y N-, tal y como muestra la figura 38, donde se han dibujado los componentes intrínsecos que permiten obtener su circuito equivalente (figura 38b). Los NPT-IGBT tienen un sustrato P+ N-, lo que permite extender la región de carga espacial a toda la zona N-, obteniéndose de esta forma dispositivos capaces de soportar elevadas tensiones.

En cualquiera de las dos tecnologías resalta la presencia de un tiristor parásito interno entre el colector y emisor (formado por el transistor pnp junto con el npn) figura 38b. El cebado de este tiristor provocaría una pérdida de control y la posible destrucción del dispositivo. En los IGBT comerciales, tanto de tecnología PT como NPT, se ha reducido la probabilidad de cebado de este tiristor mediante una fuerte reducción del valor de la resistencia  $R_p$  que podría polarizar el transistor npn.

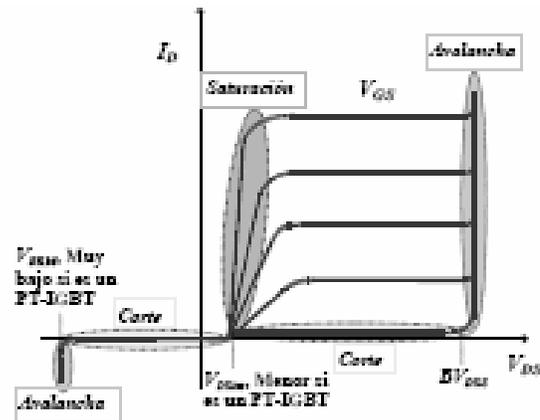
Cada tecnología emplea técnicas diferentes para lograr este propósito, actualmente los fabricantes ofertan los dispositivos libres de este problema en rangos de corriente muy elevados con respecto a la nominal. Por lo tanto, se puede decir que el IGBT opera como un transistor pnp controlado por un MOSFET, es decir, funciona de forma aproximada según el circuito equivalente de la figura 38c.

**Estados del IGBT.** El IGBT tiene dos estados de funcionamiento estables que son: saturación y el de corte. Para mantener el IGBT en conducción se mantiene la tensión puerta-emisor (VGE) por encima de la tensión umbral, o tensión umbral de puerta “*Gate Threshold Voltage*” (VGE(th)), valor cercano a los 5 V.

En conducción, el IGBT se comporta como un transistor bipolar con una tensión de saturación, o tensión de saturación colector a emisor “*Collector-to-Emitter Saturation Voltage*” (VCEsat), cuyo valor es función de VGE, la corriente de colector (IC) y la temperatura. El IGBT se encuentra en corte cuando, una vez terminado el proceso de apagado, la tensión VGE se mantiene por debajo de la tensión umbral. La máxima tensión que soporta un IGBT se denomina tensión de ruptura colector-emisor “*Collector-to-Emitter Breakdown Voltage*” (VCES). La transición entre estos dos estados se realiza durante las conmutaciones de encendido y apagado.

Durante estas conmutaciones es necesario cargar y descargar las diferentes capacidades parásitas del IGBT, por lo que dichas conmutaciones se verán fuertemente influenciadas por estas capacidades y por la resistencia de puerta (RG). Conviene señalar que en la mayoría de los convertidores, el encendido (apagado) del IGBT provoca el apagado (encendido) de un “diodo complementario”, lo que influye considerablemente en las formas de onda de corriente y tensión. En la figura 39, se muestra la curva característica del IGBT de canal n.

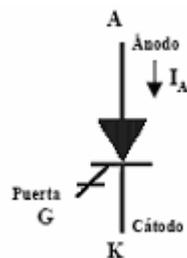
Figura 39. Curva característica estática de un transistor IGBT de canal-n



### 3.2.3 SGCT

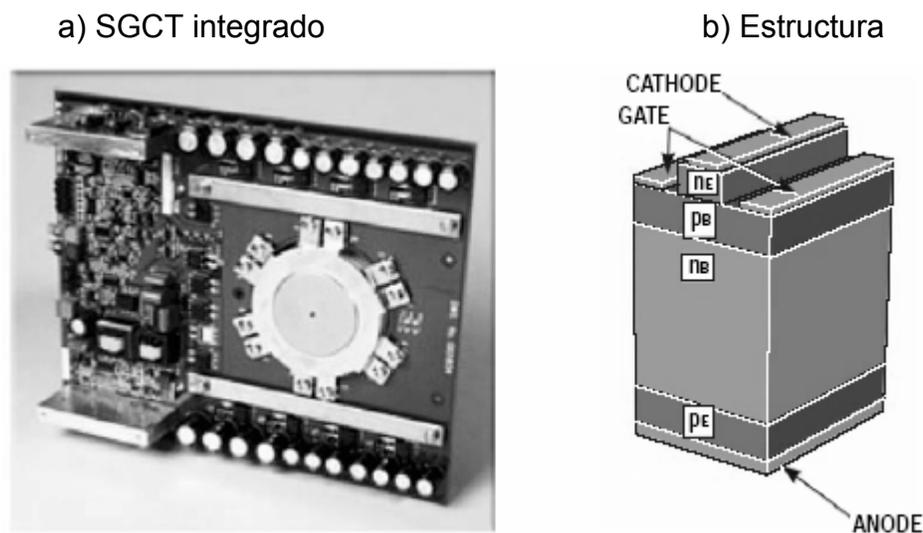
El SGCT o tiristor simétrico conmutado por puerta "*symmetrical gate commutated thyristor*" es un interruptor semiconductor de potencia, de alta frecuencia de conmutación y con enfriamiento en ambas caras, el cual básicamente es un tiristor bloqueable por puerta (GTO) modificado, con un control de puerta integrado. En la figura 40 se muestra su símbolo.

Figura 40. Símbolo del SGCT



**Estructura.** Posicionando el manejador de puerta cerca del SGCT como se muestra en la figura 41b, se crea una ruta de baja impedancia que provee un control de puerta más eficiente y uniforme del dispositivo. Como resultado el dispositivo es más conveniente que un convencional GTO para manejar los niveles de fluctuación del voltaje y la corriente, mientras se enciende (estado de conducción) y apaga (estado de bloqueo) durante los disparos de la puerta.

**Figura 41. SGCT con control de puerta integrado y estructura del SGCT**



Fuente: Manual del Usuario, **Medium Voltage AC Drive PF 7000**, Rockwell Automation

El SGCT bloquea el voltaje en ambas direcciones, no como su predecesor el tiristor conmutado por puerta (GCT), el cual es un dispositivo asimétrico capaz de bloquear únicamente el voltaje en una dirección. La característica del SGCT de bloquear el voltaje de forma bidireccional lo hace muy útil para aplicaciones en modulación por ancho de pulso (PWM), inversores de fuente de corriente (PWM-CSI), donde la corriente es unidireccional pero el voltaje puede asumir ambas polaridades, produciendo un control inherente regenerativo.

El SGCT es capaz de bloquear el voltaje en ambas direcciones debido a su estructura NPT (Non-Punch-Through) y su casi simétrico transistor pnp ( $pB-$ ,  $nB-$ ,  $pE$ ) parecido a una galleta, como se puede observar en la figura 41b.

### **3.3 Principios de variación de velocidad en motores AC con torque constante**

El primer método desarrollado para regular la velocidad de la máquina de inducción fue la inclusión de resistencia adicional en el circuito rotórico. El problema con este procedimiento consiste en el excesivo consumo de energía en pérdidas.

Posteriormente se utilizó el mismo principio, pero en lugar de quemar la energía en una resistencia externa, se rectificaba la tensión del rotor y con esta potencia se accionaba a una máquina de corriente continua, que a su vez motorizaba a un generador sincrónico y devolvía el exceso de potencia a la red. Este método, conocido como cascada de Kramer, requería de un gran número de máquinas para controlar la velocidad de la máquina de inducción, además las eficiencias de toda la cascada no son muy altas.

La regulación de la tensión en el estator permite ajustar la velocidad en un rango limitado, debido a que el torque eléctrico depende del cuadrado de la tensión de alimentación. Las máquinas con alta resistencia en el circuito rotórico amplían el rango posible de control de velocidad con este método.

En algunos procesos, donde se necesitan dos o tres velocidades, es posible mediante un cambio en las conexiones de las bobinas, alterar el número de pares de polos de la máquina variando de esta forma la velocidad sincrónica mecánica. Este método se utiliza en la actualidad en los elevadores o ascensores residenciales y en muchas otras aplicaciones.

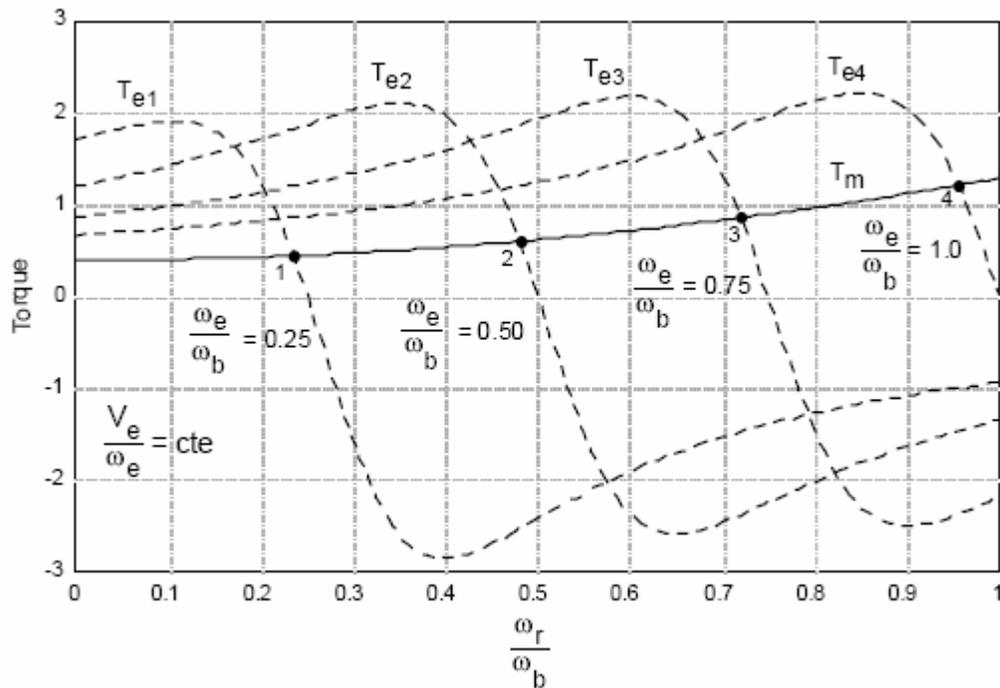
Un sistema de gran difusión industrial es el controlador tensión-frecuencia constante. En este controlador se alimenta la máquina de inducción con una fuente de alimentación con tensión y frecuencia variable para ajustar la velocidad sincrónica. La tensión de alimentación se mantiene proporcional a la frecuencia para que la máquina opere siempre con la misma densidad de flujo en el entrehierro. Este método de control de velocidad requiere fuentes que ajusten la amplitud y la frecuencia de la fuente. En un principio esto se realizaba mediante un sistema Ward-Leonhard – Motor de corriente continua controlando la velocidad de un generador sincrónico -. Hoy por hoy los inversores modernos logran este objetivo más eficientemente y con menor costo.

Durante muchos años el control tensión-frecuencia constante reguló la velocidad de los motores de inducción. Sin embargo, el desarrollo sostenido de los controladores electrónicos de potencia no ha sido capaz de sustituir completamente a la máquina de corriente continua por la de inducción. Una de las principales razones para este hecho es que la máquina de corriente continua posee tiempos de respuesta menores y características de operación, difíciles de obtener con otras máquinas. Se desarrollaron modelos de la máquina de inducción mediante la técnica de los fasores espaciales y la teoría del campo orientado. Con estas nuevas herramientas se intentó reproducir los controles de la máquina de continua, pero aparecieron limitaciones que aun hoy día no han podido ser superadas completamente. Sin embargo, actualmente se dispone a nivel comercial de controladores de máquinas de inducción que utilizan ampliamente los fasores espaciales y la teoría del campo orientado.

**Control por tensión-frecuencia.** El primer controlador de velocidad de las máquinas de inducción y tal vez uno de los más utilizados en la práctica, consiste en regular la frecuencia de la fuente de alimentación. Variando la frecuencia de las tensiones aplicadas a las bobinas del estator, cambia la velocidad de sincronismo de la máquina. La variación de la frecuencia afecta proporcionalmente las reactancias de magnetización y dispersión en el circuito equivalente, pero las resistencias se mantienen aproximadamente constantes, considerando que el efecto pelicular no es muy pronunciado. Para que la densidad de flujo magnético se mantenga prácticamente constante, y dentro de los límites de diseño de la máquina, es conveniente variar la amplitud de la tensión de alimentación en la misma proporción que se varía la frecuencia. De esta forma, la magnitud del torque eléctrico es similar a la que se obtiene a frecuencia nominal, pero la velocidad es variable.

En la figura 42, se presentan las características torque eléctrico velocidad para una máquina de inducción alimentada mediante cuatro frecuencias diferentes, manteniendo constante la relación entre la amplitud de la tensión de alimentación y la frecuencia. Incrementando paulatinamente la frecuencia es posible acelerar una carga mecánica pasando por los puntos 1, 2, 3, hasta alcanzar el punto 4. Si la variación de la frecuencia es lenta en comparación con la inercia del conjunto máquina-carga mecánica, la corriente se reduce con respecto a un arranque directo.

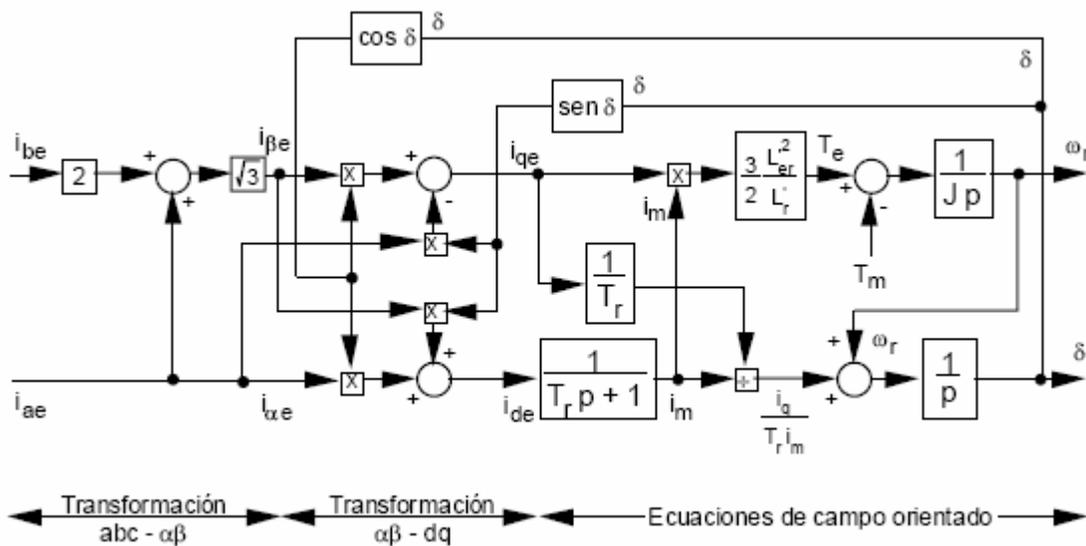
**Figura 42. Control tensión-frecuencia constante en la máquina de inducción**



También es posible mantener cualquier punto de operación intermedio, aumentando o reduciendo la velocidad. Operando a baja frecuencia, se incrementa el torque de arranque, pero el torque máximo de la máquina es prácticamente constante, siempre y cuando las reactancias sean mucho mayores que las resistencias del modelo.

**Control por campo orientado.** En la figura 43, se presenta el diagrama de bloques que corresponde al modelo de la máquina de inducción en variables de campo orientado y la transformación desde las coordenadas primitivas a estas nuevas coordenadas. En este modelo, el torque eléctrico depende del producto de la corriente de magnetización y de la corriente cuadratura del estator. Los sistemas de control por campo orientado se fundamentan en la posibilidad de ajustar el valor de estas dos variables.

**Figura 43. Modelo de la máquina de inducción en variables de campo orientado**



Tal como sucede en las máquinas de corriente continua, el campo tiene una constante de tiempo relativamente lenta y es conveniente para incrementar la velocidad de respuesta del sistema, mantener la corriente de magnetización en el máximo valor posible. De esta forma el torque se controla mediante la corriente cuadratura. La corriente de magnetización se controla mediante el ajuste de la corriente directa. En régimen permanente estas dos corrientes tienen el mismo valor.

El principal problema de los controladores por campo orientado consiste en determinar el valor de las corrientes o tensiones de alimentación en variables primitivas, que producen los valores deseados de las variables de campo orientado. La transformación directa e inversa entre variables primitivas y variables de campo orientado dependen de la posición instantánea del fasor espacial de la corriente de magnetización. Esto presenta un problema importante al diseñar este tipo de controladores, debido a que no resulta simple medir o estimar este ángulo. La medición requiere incluir sensores especiales en la máquina, estimar esta posición requiere la integración en tiempo real del sistema de ecuaciones diferenciales que la modelan. La primera solución es costosa y difícil de implementar en la práctica. La segunda alternativa depende de la velocidad del estimador, de la exactitud del modelo y de la variabilidad de los parámetros durante la operación.

**Control directo de par.** Los controladores de velocidad y/o posición de la máquina de inducción requieren lazos de realimentación de estas variables mecánicas. Por esta razón, es una práctica frecuente utilizar sensores mecánicos acoplados directamente al eje del rotor.

En las últimas décadas, un gran número de investigadores han centrado sus esfuerzos en resolver el problema de la medición de velocidad angular del rotor sin utilizar sensores mecánicos (Riese, 1997, Cameron et al., 1983, Restrepo & Bowler, 1995, Aller et al., 2002). Ellos han propuesto varias técnicas de estimación paramétricas en tiempo real para reducir los problemas de los controladores y mejorar la respuesta dinámica de estos sistemas. Depenbrock propuso y patentó el Direct Self Control (DSC) (Depenbrock, 1985). Esta técnica reduce considerablemente la dependencia del controlador de velocidad con los parámetros del modelo de la máquina de inducción. Takahashi y Noguchi propusieron una estrategia de control similar al DSC denominada control directo de par (DTC) (Noguchi & Takahashi, 1986).

El control directo de par se fundamenta en una tabla de activación para un puente inversor que utiliza una estrategia que combina un control *bang-bang* (inversor con histéresis) con comparadores de histéresis de dos y tres niveles que permiten ajustar el enlace de flujo magnético del estator de la máquina de inducción y el par eléctrico instantáneo con sus respectivas referencias. El control directo de par mejora las características dinámicas de los controladores de velocidad de la máquina de inducción y reduce la dependencia de la variación de los parámetros durante la operación.

### **3.4 Sistema controlador y lógica de operación**

Esta sección específicamente trata sobre el variador de velocidad AC de mediana tensión PowerFlex 7000 (PF7000) fabricado por Rockwell Automation instalado en Ingenio La Unión S.A.

El PowerFlex 7000 es un variador de velocidad AC, en el cual el control de la velocidad del motor es hecho a través del control del torque del motor. La velocidad del motor es medida y el torque es ajustado como se requiera para hacer que la velocidad medida sea igual a la velocidad preprogramada. El motor y la carga determina la frecuencia del estator y el variador por sí mismo se sincroniza al motor. Este hace lo contrario a los variadores escalares de CA más comunes del tipo voltios por hertz, en los cuales el variador determina la frecuencia del estator y no intenta sincronizar su salida a el motor.

El método de control utilizado es conocido como control vectorial directo. El término control vectorial indica que la posición del vector corriente del estator es controlada en relación al vector flujo del motor. Control vectorial directo significa que el flujo del motor es medido, en contraste a los variadores más comunes que son de control vectorial indirecto en los cuales el flujo del motor es predecido o estimado. En ambos casos la corriente del estator se descompone en componentes de producción de flujo y torque, las cuales son controladas independientemente.

El propósito es poder desarrollar una similitud a la máquina de DC, en la cual el torque pueda ser cambiado rápidamente sin afectar el flujo. El flujo no puede ser cambiado rápidamente debido a la constante de tiempo del rotor, porque se encuentra en el orden de los segundos para las máquinas grandes.



### 3.4.2 Entradas / Salidas

La tarjeta de entradas/salidas externas (XIO, *external input / output*), maneja todas las señales externas digitales y análogas y las envía a la tarjeta de interfaz del cliente. Existen 16 entradas aisladas y 16 salidas aisladas en la tarjeta, y ellas son utilizadas para e/s (entradas/salidas) en tiempo real incluyendo arranque, parada, funcionamiento, falla, alertas y avisos, jog y señales de reposición externas. La tarjeta también maneja las señales estándar de falla del variador (sobre temperatura del transformador/reactor de línea, sobretensión de enlace cc, etc.) así como varias señales configurables de entrada.

**Entradas.** A continuación se describe cada una.

***Not stop.*** Se utiliza para detener o parar el motor eléctrico.

***Start.*** Se utiliza para arrancar el motor eléctrico.

***Forward.*** Se emplea para que el motor gire en la dirección hacia delante.

***Reverse.*** Se emplea para que el motor gire en la dirección de reversa.

***Jog.*** Se utiliza para que realizar pruebas del motor y variador, entiéndase rotación y medición de parámetros eléctricos.

***Local.*** Se emplea para realizar un arranque de control externo ubicado lejos del variador.

***Drive reset.*** Se emplea para reiniciar el variador.

***Request to bypass.*** Si se utiliza esta entrada, se puede transferir de forma sincronizada el motor entre el variador y una fuente de frecuencia fija en cualquiera de las direcciones sin parada y con una muy corta interrupción de potencia del motor, al ser activada.

***Input protección.*** Contacto que indica al variador que va a existir una apertura en el alimentador principal, y así pueda realizar el equipo una desenergización correcta en los transistores de salida de potencia. Debido a que el variador utiliza componentes como fuente de corriente, los cuales no pueden ser desenergizados sin previo aviso.

***Overtemperature (rect magntcs).*** Se utiliza como protección por sobretemperatura para el reactor magnético, que genera una señal de alarma y/o parada del motor.

***Overtemperature (dc link).*** Se utiliza como protección por sobretemperatura en el transformador de enlace, que genera una señal de alarma y/o parada del motor.

***Motor protection.*** Señal proveniente de la protección del motor utilizada para indicar que ocurrió una falla en el motor.

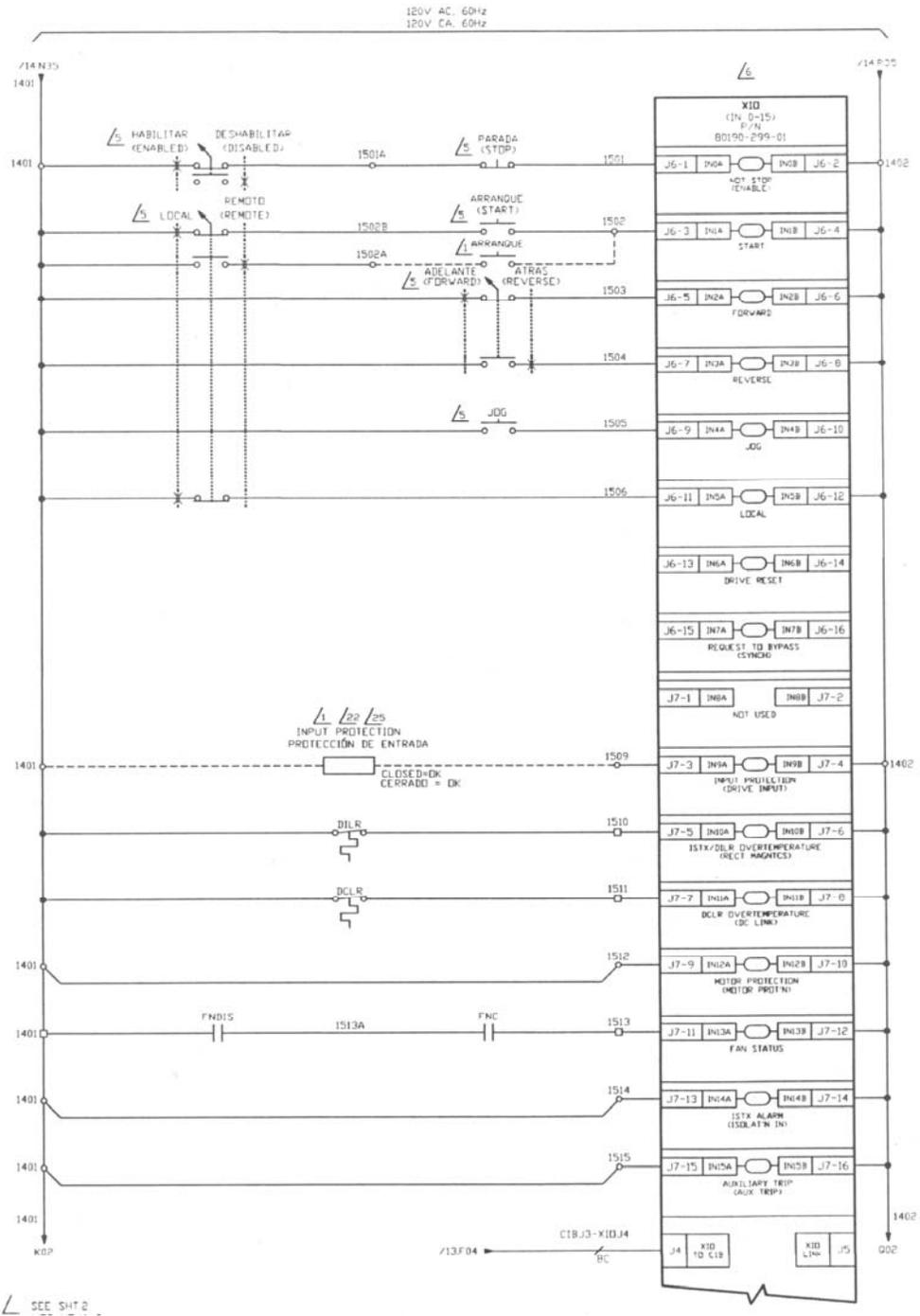
***Fan status.*** Señal proveniente del ventilador que indica si este está o no funcionando.

***Istx alarm.*** Para el caso en el que se emplee el transformador de aislamiento, esta entrada provee una señal de alarma por alta temperatura.

***Auxiliary trip.*** Realiza la misma función que *input protection*, controlado por un equipo auxiliar.

La figura 45 muestra el diagrama eléctrico de las entradas en la tarjeta XIO.

**Figura 45. Diagrama eléctrico de las entradas en la tarjeta XIO**



Fuente: Manual de servicio, Rockwell Automation, Diagrama No. 15.

**Salidas.** A continuación se describe cada una.

***In torque limit.*** Contacto normalmente abierto, que indica cuando el motor esta operando dentro del rango de torque límite.

***In transition.*** Contacto normalmente abierto, que habré y cierra constantemente, mientras se este ejecutando la rampa de encendido o de parada del motor.

***Fan 2 FNC.*** Contacto normalmente abierto, que indica la operación del ventilador 2.

***Fan 1 FNC.*** Contacto normalmente abierto, que indica la operación del ventilador 1.

***Cooling alarm.*** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que el nivel de temperatura esta sobre el valor seguro de operación.

***At speed.*** Contacto normalmente abierto, que indica que se esta operando a velocidad preestablecida.

***In test mode.*** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que el variador esta corriendo en modo de prueba o de diagnóstico, y así no realizar una energización del motor.

***Warning.*** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que se presento una señal de precaución.

**Fault.** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que se presentó una señal de falla.

**Remote.** Contacto normalmente abierto, que indica que se esta operando en modo remoto.

**Local.** Contacto normalmente abierto, que indica que se esta operando en modo local.

**Jog.** Contacto normalmente abierto, que indica que se esta ejecutando el jog.

**Reverse.** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que el motor esta girando en reversa.

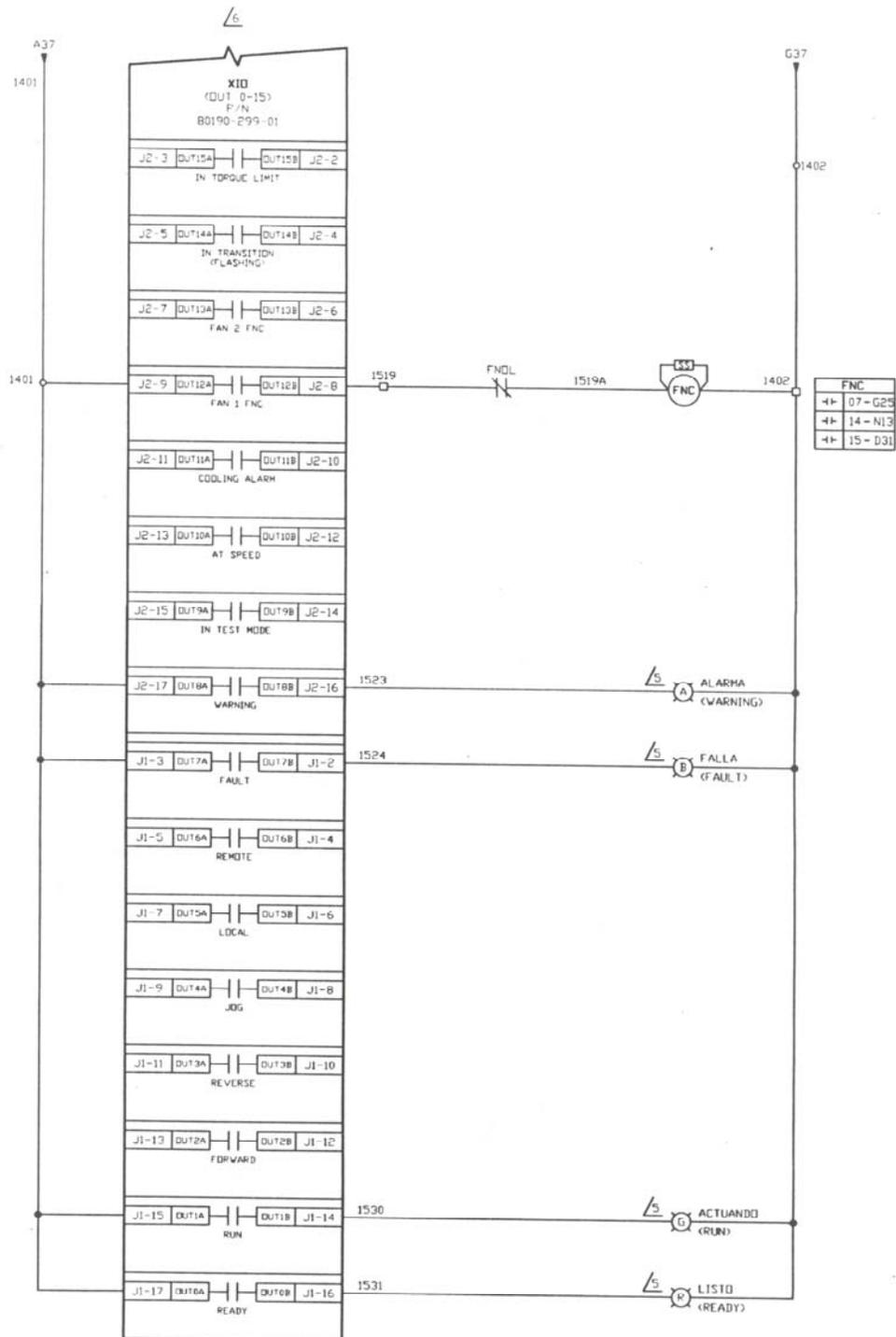
**Forward.** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que el motor esta girando en la dirección hacia delante.

**Run.** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que el motor arrancó y esta corriendo.

**Ready.** Contacto normalmente abierto, que cierra para indicar que el motor esta listo para operar.

La figura 46 muestra el diagrama eléctrico de las salidas de la tarjeta XIO.

**Figura 46. Diagrama eléctrico de las salidas en la tarjeta XIO**



Fuente: **Manual de servicio**, Rockwell Automation, Diagrama No. 15.

### 3.4.3 Interfase de operación

La terminal de interfaz del operador esta compuesta por

- a) Una pantalla LCD basa en píxeles, de 16 líneas y 40 caracteres, que facilita la lectura de textos y gráficos, en la que se pueden realizar diversas operaciones del variador de frecuencia tales como la configuración, el monitoreo y el diagnóstico.
- b) Teclado de membrana que incluye teclas de función, teclas de selección del cursor y teclas de números para la navegación en el menú, la selección de ítems y el ingreso de datos.
- c) Grupo de dispositivos para el operador estándar que incluye botones pulsadores de arranque, parada y parada de emergencia, interruptor de selección local/remota y potenciómetro de velocidad local.

**Figura 47. Terminal de interfase del operador para el variador PF7000**

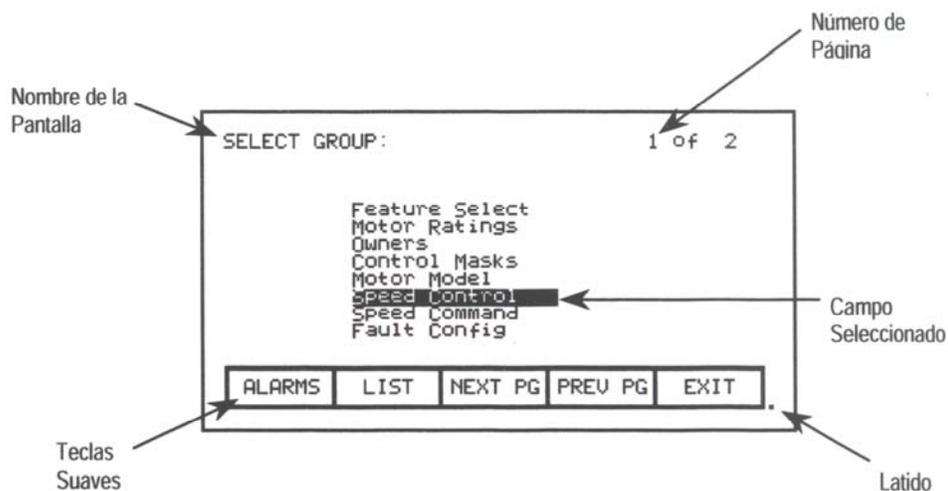


Fuente: **Manual de Usuario**, Medium Voltage AC Drive PF 7000, Rockwell Automation, p. 1-16.

En la figura 47, se aprecia la interfase con el operador. Desde la interfase del operador se pueden acceder a modos de pruebas, funciones de diagnósticos, chequeo de las compuertas a bajo voltaje, corrido a plena corriente sin el motor conectado, colas separadas de fallas y advertencias en una memoria RAM no volátil (NVRAM), textos de falla extensos y ayuda en línea, todo esto con la idea de determinar el estado del variador y de sus componentes más básicos como los son los dispositivos semiconductores.

La información del variador es mostrada en pantallas, a pesar que los datos desplegados en cualquier pantalla pueden variar, la composición de una pantalla es la misma para todas y esta se muestra en la figura 48.

**Figura 48. Pantalla típica y sus componentes**



Fuente: **Manual de usuario** del variador de velocidad AC PF 7000, p. 3-6.

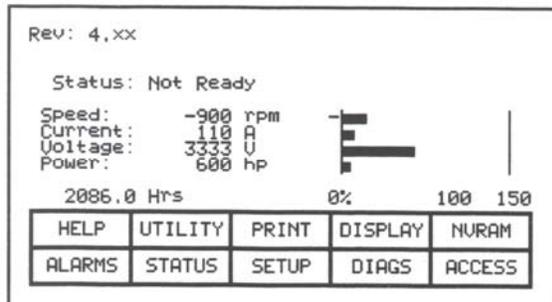
- La esquina superior izquierda contiene el nombre de la pantalla. En algunas pantallas, a la derecha del nombre, estará el título del campo seleccionado en la pantalla previa.

- Esquina superior derecha contiene el número de página o páginas que contiene la pantalla.
- A lo largo de la parte inferior de la pantalla están una o dos líneas de “teclas suaves” que representan la asignación actual de las teclas de funciones.
- Muy a la esquina inferior izquierda existe un pequeño punto. Este indica el estado de “salud” del terminal interfaz con el operador. Bajo condiciones normales, este punto va a destellar a una velocidad de 0.5 Hz. Durante errores de comunicación, el punto va a destellar a una velocidad de 0.1 Hz.
- El resto de la pantalla muestra los datos del variador. La presentación de estos datos es dependiente de la pantalla.

**Menú principal o menú tope.** El operador cuenta con la posibilidad de acceder a diferentes menús partiendo del menú principal y haciendo uso de las teclas de función, para realizar las configuraciones necesarias de operación del variador. En el diagrama 2 del anexo, se muestra el árbol de menús de la interface del operador para el PF7000.

La pantalla del menú principal esta formada de la siguiente manera: en la parte superior se muestra la versión del programa del interfase del operador, después el estado del variador, a continuación cuatro medidores digitales muestran cuatro parámetros seleccionados, un contador despliega el número de horas que el variador ha estado corriendo, y por último en la parte inferior de la pantalla se muestran las dos filas de teclas suaves relacionadas con los diferentes submenús con los que cuenta el variador, en la figura 49, se muestra la pantalla principal.

**Figura 49. Pantalla principal**



Fuente: **Manual de usuario** del variador de velocidad AC PF 7000, p. 3-11.

Para activar un submenú, simplemente se presiona la tecla de función correspondiente a la tecla suave mostrada en la pantalla.

### **3.4.4 Configuración / Parametrización**

Con el fin de ajustar el variador al motor y a la aplicación, un número de elementos deben ser definidos en el variador por medio de la interfáz con el operador. La configuración en el variador es protegida de cambios no autorizados a través de un *password*, que consiste de un número entre 0 y 65535. Hay distintos niveles de acceso al variador, cada nivel de acceso, (exceptuando el primero “monitor”) tiene su propio número de *password*. Estos valores pueden ser únicos o todos pueden ser ajustados al mismo valor. Los niveles de accesos posibles son los siguientes: monitor, básico, avanzado, de servicio, y Rockwell. Cada nivel permite el acceso a los parámetros y permisos de los niveles más bajos.

El nivel de acceso por defecto es “monitor”, en este nivel solamente un subgrupo pequeño de parámetros de la base de datos es visualizable, ningún cambio es permitido. El próximo nivel es el “básico” este nivel y todos los niveles superiores permiten que los cambios sean hechos a cualquiera de los parámetros que se visualicen, este nivel será suficiente para la configuración y el mantenimiento del variador para la mayoría de las aplicaciones. Desde el nivel “avanzado” el variador puede ser configurado en su totalidad. Dos niveles adicionales son utilizados para el personal de servicio entrenado y solamente son usados cuando los cambios en el *hardware* físico son hechos en el variador.

Los parámetros para la configuración del variador vienen clasificados por grupos, de acuerdo al equipo al que pertenecen y a su función, y para poder seleccionar un parámetro, existen tres métodos:

- a) A través de grupos.
- b) A través del nombre.
- c) A través del código.

**A través de grupos.** Es el método por defecto, en este submenú los parámetros se encuentran clasificados por grupos de acuerdo a su función. Para cambiar un parámetro se ingresa al grupo que pertenece, se selecciona dicho parámetro y se actualiza el nuevo valor.

**A través del nombre.** Cuando se conoce el nombre del parámetro que se desea seleccionar, pero no se sabe a que grupo pertenece o se está inseguro respecto al nombre completo, este método de selección podría ser el apropiado.

**A través del código.** Permite seleccionar un parámetro, tomando en cuenta que se conoce el código asociado del parámetro. Cada parámetro tiene un código asociado, para identificarlo de los equipos incapaces de tomar decisiones basadas en el nombre, como un PLC por ejemplo. Usar las teclas de entradas de datos [0] - [9] para introducir el código deseado en la pantalla “selección de código”. Si el código ingresado es válido, se mostrará el nombre de la etiqueta asociada con el código. Esto con el propósito de verificar si es el parámetro correcto que uno desea editar. Si es incorrecto, inmediatamente repetir el proceso, ingresando otro código. Si el código del parámetro no es válido, un mensaje indicando esto será desplegado.

En el caso de editar un parámetro el nuevo valor no es enviado al variador hasta que se salga de la pantalla actual presionando la tecla F10. Previo a esto, se puede modificar el nuevo valor repitiendo el procedimiento de edición de parámetro elegido, o bien se puede cancelar los cambios presionando la tecla F7. La operación de cancelar regresa el nuevo valor al actual.

### **3.4.5 Comunicaciones**

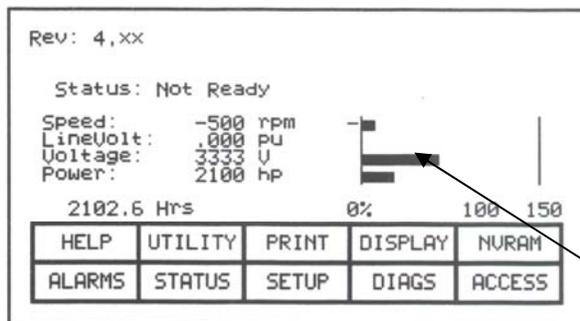
El variador PF7000 puede integrarse a un sistema en red, de control y monitoreo, ya que cuenta con la posibilidad de poder comunicarse externamente con un PLC o bien a un DCS (Sistema de Control Distribuido), o cualquier otro sistema, a través de cualquiera de los siguientes protocolos: DF1, DH plus, Profibus, Device Net, DH485. Únicamente se necesita instalar una tarjeta electrónica de comunicación, de acuerdo al protocolo que se desee manejar.

### 3.4.6 Monitoreo

La operación de monitoreo del variador puede efectuarse de dos formas:

**A través de la interfáz del operador.** En la pantalla inicial que representa al menú principal o menú tope, continuamente están activos cuatro medidores digitales de barra. Estos medidores muestran los valores actuales de las variables principales que son: Velocidad, Corriente, Voltaje y Potencia. Estas variables están asignadas por defecto a los medidores, pero se cuenta con la posibilidad de poder configurar cualquier otro parámetro disponible que se desee monitorear, y asignarlo a cualquiera de los cuatro medidores. En la figura 50, se observan los medidores digitales de barra en la pantalla inicial

**Figura 50. Medidores digitales de barra**



Medidores digitales

Fuente: **Manual de usuario** del variador de velocidad AC PF 7000, p. 3-20.

Si se desea variar la velocidad, esto se puede realizar desde la interfáz del operador, haciendo uso del teclado.

El variador dispone de registros configurables a cualquier parámetro, que pueden registrar el valor de dicho parámetro cada cierto tiempo en un intervalo de tiempo determinado, para posteriormente ser descargados a una PC y poder analizar detenidamente el comportamiento de las lecturas obtenidas.

**A través de un sistema externo.** El variador puede ser monitoreado por un PLC o cualquier otro sistema al que se integre, que maneje cualquiera de los protocolos disponibles en el variador, y la variación de velocidad puede ser realizada de forma remota, a través del sistema.

### **3.5 Algoritmo de control**

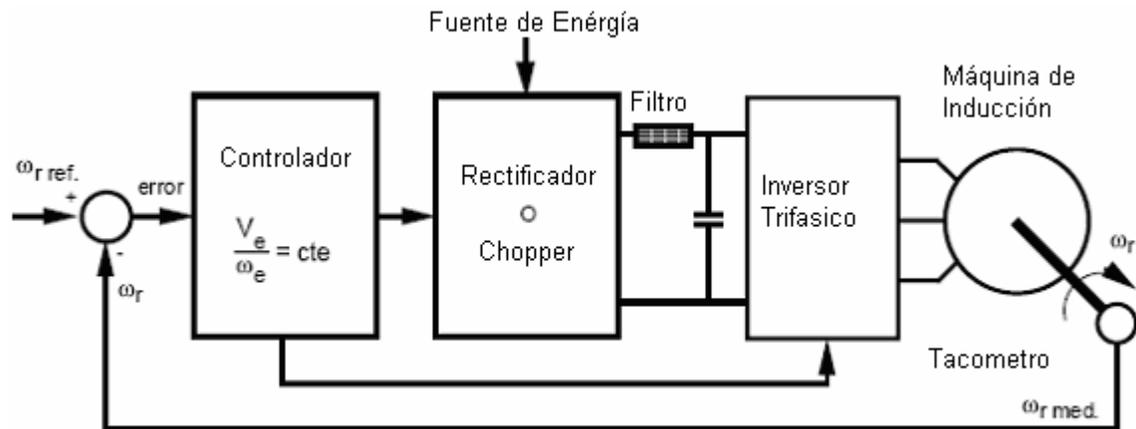
Como ya se mencionó, las técnicas de control de velocidad más ampliamente utilizadas en los variadores son: control por tensión-frecuencia o escalar, control por campo orientado o control vectorial, y control directo de torque (DCT). Cada una presenta ventajas y desventajas dependiendo de cada aplicación.

#### **3.5.1 Funcionamiento como torque constante o velocidad constante**

**Control tensión-frecuencia.** En este caso el controlador de velocidad requiere una fuente de tensión trifásica regulable en magnitud y frecuencia, para ello los inversores de tensión convierten fuentes de tensión o corriente continua en fuentes de tensión o corriente alterna. La tensión de salida del inversor debe ser polifásica y balanceada. Si la fuente primitiva es de corriente alterna, la tensión de entrada al inversor puede ser variada mediante un puente rectificador controlado. La fuente de corriente continua obtenida mediante bancos de baterías o por rectificación no controlada de sistemas de tensión alterna, se pueden regular mediante troceadores de tensión o “choppers”. La rapidez alcanzada hoy por hoy por los elementos semiconductores de interrupción permiten, controlar el ancho del pulso de la onda e incluso su contenido armónico.

En la figura 51, se muestra el diagrama de un controlador de velocidad para un motor de inducción que utiliza el método tensión-frecuencia constante.

**Figura 51. Variador de velocidad por control tensión-frecuencia constante**



Fuente: **Conversión de energía eléctrica**, José Manuel Aller, p. 26.

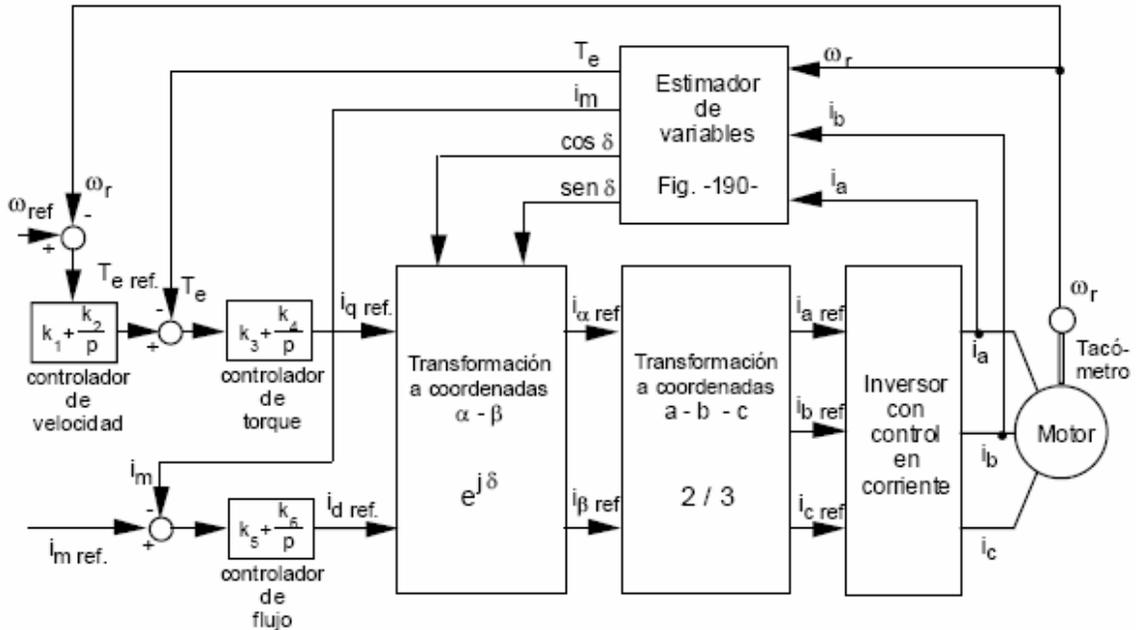
El sistema realimenta la velocidad o la posición del eje mecánico y lo compara con una referencia determinada por el usuario o por la aplicación. El error obtenido de la comparación entre las medidas y las referencias es utilizado por el controlador para definir las señales de encendido y apagado de las componentes semiconductoras tanto del rectificador o chopper, como del propio inversor. Además este controlador debe introducir un retardo en el proceso para evitar que las corrientes en la máquina sean demasiado grandes. El rectificador o el chopper, varían la amplitud de la tensión de la fuente de energía y después de ser filtrada, esta tensión alimenta al inversor trifásico. El inversor aplica una tensión alterna no sinusoidal a la máquina con una frecuencia y una tensión determinada por el controlador. El controlador puede ser analógico o digital, y en la actualidad se utilizan con frecuencia microprocesadores para realizar las funciones de este subsistema, lo cual le confiere una gran versatilidad.

**Control por campo orientado.** En la figura 52, se muestra el controlador de velocidad de un motor de inducción en coordenadas de campo orientado donde

se utiliza un inversor controlado en corriente. El inversor inyecta las corrientes en el estator de la máquina según la referencia calculada previamente por el controlador. De la medición directa de las corrientes por las bobinas y de la velocidad del rotor se estiman los valores de las variables transformadas mediante un modelo de la máquina. Estos valores permiten calcular el torque eléctrico y la corriente de magnetización. Las estimaciones pueden compararse con los valores de torque y velocidad deseados y producir un error que se utiliza para incrementar o disminuir las referencias de la corriente directa y cuadratura. Las referencias de corrientes, obtenidas a partir de las diferencias entre torques y velocidades, deseados y estimados, se transforman al sistema de coordenadas  $\alpha$  y  $\beta$ , para lo cual es necesario utilizar la estimación de la posición del fasor espacial de la corriente de magnetización.

Las corrientes de referencia en coordenadas  $\alpha$  y  $\beta$  se transforman nuevamente a variables primitivas a, b y c. Las corrientes de referencia se aplican como entrada al inversor controlado en corriente. El inversor sigue muy de cerca a las referencias de corriente en coordenadas primitivas e inyecta a las bobinas de la máquina estas corrientes. La referencia de la corriente de campo es conveniente mantenerla en el mayor valor posible para incrementar la velocidad de respuesta del sistema. Cuando la máquina excede la velocidad sincrónica, es recomendable debilitar el campo para no exceder el límite de la potencia nominal.

**Figura 52. Controlador de velocidad en coordenadas de campo orientado**



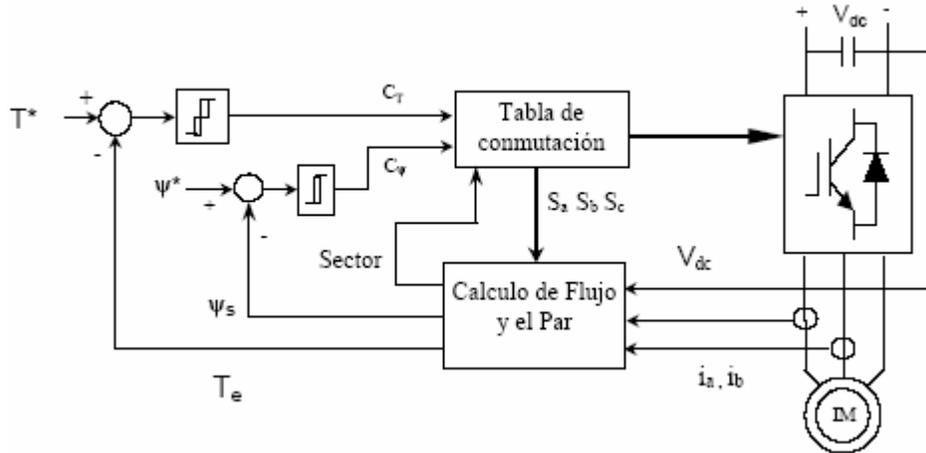
Fuente: **Conversión de energía eléctrica**, José Manuel Aller, p. 27.

El inversor controlado por corriente es un convertidor electrónico que mide las corrientes por cada fase del puente y las compara con las referencias. Cuando la diferencia entre el valor medido de la corriente en una fase y su referencia exceden un cierto valor de histéresis, se conecta uno de los interruptores de la rama del puente que corrige el error. Si la corriente es menor que la referencia se conecta la fase correspondiente, a la barra positiva del puente mediante el interruptor estático. Si la corriente es mayor que la referencia se conecta la fase a la barra negativa. Para las diferencias comprendidas dentro del rango de la histéresis no se alteran las condiciones previas de conectividad de los interruptores.

En este control del inversor es necesaria un cierto retardo en la variación de las corrientes para evitar que la frecuencia de operación de los interruptores estáticos sea muy elevada. El retardo depende de la relación entre las inductancias y resistencias de la máquina. Aumentar la histéresis del control, disminuye la frecuencia de interrupción, pero reduce la precisión en el seguimiento de la referencia. El controlador de velocidad de la figura 52 también puede ser realizado mediante puentes controlados por tensión, pero en este caso es necesario añadir al modelo de estimación de variables, la ecuación de tensión del estator y calcular las referencias de tensión que producen las condiciones de torque y velocidad deseadas. El principal problema del estimador de variables internas de la máquina es la variabilidad de los parámetros con la temperatura, la frecuencia y la saturación. En particular el modelo de la máquina es muy sensible al valor de la constante de tiempo del rotor  $T_r$ , debido a que influye directamente en la magnitud y dirección instantánea de la corriente de magnetización. Los variadores de velocidad modernos incluyen esquemas de control adaptivo que determinan y corrigen en línea el valor de la constante de tiempo del rotor utilizado por el estimador de variables.

**Control directo de par (DTC).** En la figura 53, se muestra un diagrama esquemático de un sistema de control directo de par. Los componentes principales del DTC son el módulo de regulación por histéresis del par electromagnético y del flujo magnético.

**Figura 53. Diagrama a bloques del sistema de control directo de par**



Fuente: **Principios de control directo del par**, Jose Manuel Aller, p. 2-2.

El valor leído de la velocidad del rotor se compara con la velocidad de referencia, la señal de error se lleva al controlador de velocidad (controlador PI) y la salida de éste es el valor del referencia del par electromagnético. Comparando ambas señales del par se obtiene un error, el cual es la entrada de controlador de histéresis de tres niveles y cuya salida va a la tabla de conmutaciones; La magnitud del flujo se compara con el flujo de referencia y el error entra a un controlador de histéresis de dos niveles, cuya salida entra también a la tabla de conmutaciones. La figura 54 muestra los controladores de histéresis y la tabla 2 muestra los valores de conmutación.

**Figura 54. Controladores de histéresis**



Fuente: **Principios de control directo del par**, Jose Manuel Aller, p. 2-4.

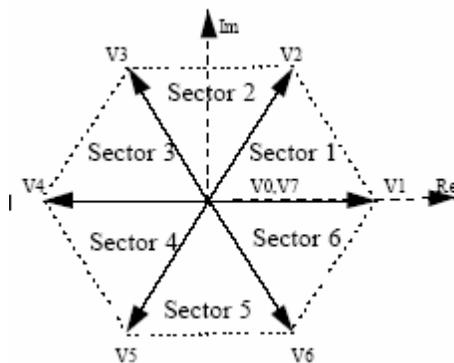
**Tabla II. Tabla óptima de conmutación**

$\Psi_s$ esta en sector K		$C_T$		
		1	0	-1
$C_\Psi$	1	$V_{k+1}$	$V_0, V_7$	$V_{k-1}$
	0	$V_{k+2}$	$V_0, V_7$	$V_{k-2}$

Fuente: **Principios de control directo del par**, Jose Manuel Aller, p. 2-3.

El ángulo del flujo pasa a través de un bloque que determina la región en el cual esta excitado el vector de flujo. Dicha región esta dividida en seis niveles que dependen del sextante en que cae el vector de flujo, tal como se muestra en la figura 55.

**Figura 55. Sectores del flujo**



Fuente: Tesis doctoral: **Aplicación de las redes neuronales en los sistemas de control vectorial de los motores de inducción**. Ing. Gamal Mahmoud Ali Sowilam, p. 4-3.

La salida del bloque anterior se lleva a la tabla de conmutaciones. El error del flujo, el error del par y el ángulo del flujo son los índices de una tabla que define el vector de estado óptimo del inversor (estado de conmutación). El control de velocidad de lazo cerrado se obtiene por medio de un controlador PI que proporciona el par de referencia.

### **3.6 Diferencias básicas entre el variador de frecuencia AC y DC**

Existen un número de diferencias claves entre los variadores AC y DC. El variador en DC típicamente incorpora controladores rectificadores de silicio (SCRs), para transferir potencia entrante en alterna para controlar la tensión aplicada del motor DC. Aún cuando los variadores DC son frecuentemente menos caros, inicialmente, los motores DC, los cuales emplean escobilla, generalmente son más caros y requieren mayor mantenimiento que los motores AC. Sin embargo, los variadores DC, pueden proveer un control de velocidad y torque extremadamente preciso e independiente.

Los variadores en AC usan nuevas tecnologías y pueden costar más inicialmente comparados con los variadores DC. Sin embargo, las ventajas de los motores AC, incluyen menores costos por mantenimiento y reparación, y alta eficiencia energética, que provee de un rápido retorno de inversión. Los variadores AC, típicamente son usados con técnicas de control de tensión y frecuencia con modulación de ancho de pulso (PWM) aplicadas al motor AC.

Los variadores PWM usan un rectificador de diodo puente o una completa presentación de SCRs para convertir la fuente de tensión AC en tensión DC. La tensión DC es entonces filtrada en un filtro pasa bajo. La tensión DC es luego conectada al circuito de modulación por ancho de pulso para lograr la tensión requerida y la frecuencia esperada por el motor AC. La conexión al motor AC es lograda utilizando los dispositivos de interrupción electrónicos. Muchos variadores PWM emplean transistores bipolares de compuerta aislada (IGBTs), para controlar las interrupciones requeridas por modulación de ancho de pulso. Los variadores PWM típicamente pueden reducir los armónicos mediante el control de la ocurrencia y duración de cada pulso.

Al utilizar un variador DC existe una limitante entre la distancia de separación de este y el motor síncrono, ya que con la distancia aumenta la caída de tensión en el conductor, debido al aumento de la resistencia del conductor con la distancia. Por otro lado, al utilizar un variador AC, la distancia entre este y el motor asíncrono puede llegar incluso a ser de hasta 15 Km.

Entre otras diferencias, los variadores de velocidad DC ofrecen una elevada dinámica de respuesta, bajos niveles de sobrecorriente, bajas oscilaciones en la velocidad, eficiencia variador motor entre 90 y 93 %, un 2% de regulación de velocidad, un alto contenido de distorsión armónica, y un factor de potencia bajo y variable con una corrección del mismo compleja. Los variador de velocidad AC ofrecen una elevada dinámica de respuesta, bajos niveles de sobrecorriente, bajas oscilaciones en la velocidad, eficiencia variador motor entre 94 y 99 %, una regulación de velocidad de aproximadamente 0.1 % y al utilizar encoder puede llegar a ser de 0.01 %, el contenido armónico es menor al 5 %, y un factor de potencia aceptable que puede ser corregido de forma sencilla, al utilizar tecnología AFE (*active front end*) el factor de potencia puede ser ajustable sin la necesidad de equipo para corregirlo.

## **4. ANÁLISIS Y RESULTADOS**

La razón principal de implementar nuevas tecnologías a los sistemas existentes es la de eficientar dichos sistemas. Gracias a los avances tecnológicos en el área de electrónica, electricidad y comunicaciones principalmente, se han desarrollado equipos de automatización muy especializados para la industria, que permiten alcanzar mejores resultados, como: mejor control del equipo, sistemas más sencillos de operar y confiables, comunicaciones efectivas y en tiempo real, etc., pero sin duda el beneficio más importante para cualquier empresa que cuida sus recursos es el ahorro energético, el cual puede ser traducido en ahorro y/o beneficio de costos.

En este capítulo se presenta un análisis energético de los resultados obtenidos en ingenio la Unión S.A., al aplicar los distintos sistemas motrices en el área de molinos descritos a continuación.

### **4.1 Análisis energético orientado al ahorro y venta de energía eléctrica**

Ingenio la Unión S.A. actualmente produce principalmente: azúcar, y generación de energía eléctrica. En el tiempo que dura la zafra que son aproximadamente 150 días, el bagazo de la caña que se obtiene al final del tandém de molinos, después de secado se utiliza como principal combustible en la producción de vapor. El vapor producido a la vez, una parte se utiliza en los procesos de producción de azúcar, y el resto se destina para la generación de energía eléctrica. De esta energía eléctrica una parte se utiliza en la fábrica y el resto se dispone para la venta a la red nacional.

Por tanto, para Ingenio la Unión S.A. el ahorro de vapor en el proceso de producción de azúcar es importante, porque representa mayor venta de energía eléctrica a la red nacional. Y el hecho de buscar ahorro de vapor, obliga a la búsqueda e implementación de tecnologías más eficientes.

La repotenciación de los molinos cañeros, fue la primera implementación que se realizó en Ingenio la Unión S.A. con la idea de aumentar la capacidad de molienda. Debido a la buena eficiencia del sistema eléctrico-hidráulico, a la vez, se obtuvo un ahorro considerable de vapor, lo que redundó en dos beneficios importantes.

La sustitución de las turbinas de vapor por motores eléctricos es la segunda implementación que se está haciendo durante la realización de este trabajo de graduación. Primero se realizó una prueba en uno de los molinos, y gracias a los buenos resultados obtenidos, se sustituirán en el resto de los molinos, las turbinas por los motores eléctricos. Esto con el objetivo principal de ahorro de vapor.

A continuación, para cada sistema se realiza el siguiente cálculo:

- a) Consumo y ahorro de vapor
- b) Eficiencia del equipo

#### **4.1.1. Sistema con turbina**

**a) Consumo de vapor.** Conviene aclarar que el período de zafra es de aproximadamente 150 días, y los sistemas operan las 24 horas del día. Se asumirá un tiempo perdido para este período de 7%. Se debe tomar en cuenta también, que la potencia en cada molino no es la misma, y para los cálculos que se presentan en este trabajo de graduación, únicamente se está tomando un promedio de ésta en el tandém de molinos, para poder generalizar los cálculos a una unidad o molino.

El sistema con turbina de vapor, representa a la turbina de vapor como única fuente de impulsión motriz del molino, y se utiliza como el sistema base o de referencia, con el cual se comparan los resultados obtenidos en los siguientes sistemas.

Los registros de operación de las turbinas de vapor durante zafras anteriores, muestran que el consumo de vapor en promedio utilizado para la impulsión de los molinos es de 27,000 lb. Vapor / hora por turbina.

**b) Eficiencia de la turbina.** La eficiencia de una turbina de vapor de contrapresión de una etapa, del tipo de impulsión (Curtís), que son de las utilizadas en Ingenio la Unión S. A. está dentro del rango de 0.55 a 0.65.

#### 4.1.2. Sistema con turbina y motor hidráulico

a) **Consumo y ahorro de vapor.** Los registros de operación de la zafra anterior muestran que el consumo de vapor por turbina es en promedio de 20,000 lb. Vapor / hora.

Para el motor hidráulico la potencia de operación en promedio es de 200 Kw/h. Esta potencia eléctrica se debe transformar en lb. Vapor / hora de la siguiente manera:

El turbo generador necesita 16.5 lb. de vapor para generar 1 Kw. Por tanto  
(16.5 Lb. Vapor / Kw)(200 Kw / h) = 3,300 lb. Vapor / hora

El consumo total de vapor por hora del sistema, es entonces la suma del consumo de la turbina más el consumo del motor hidráulico.

[turbina + mot. hidráulico] (lb. Vapor / hora) = consumo total (lb. Vapor / hora)

[20,000 + 3,300] (lb. Vapor / hora) = **23,300 lb. Vapor / hora**

El ahorro de vapor del sistema, se obtiene al restar del consumo de vapor del sistema con turbina (sistema de referencia) el consumo de vapor del sistema turbina y motor hidráulico.

(Consumo sistema turbina – Consumo Sistema turbina-motor hidráulico) = ahorro sistema

[27,000 – 23,300] (lb. Vapor / hora) = **3,700 lb. Vapor / hora**

Este ahorro de vapor se dispone para la venta de energía a la red nacional al utilizarlo en el turbo generador de 16.5 lb. de vapor / Kw. Y para calcularlo en kw se hace de la siguiente manera:

$$[3700 \text{ lb. Vapor / hora}] \div [16.5 \text{ lb. Vapor / Kw}] = \mathbf{224 \text{ Kw / hora}}$$

En el período de zafra la venta de energía eléctrica debido al ahorro de vapor será de:

$$\begin{aligned} \text{Venta energía} &= (224 \text{ Kw / h}) * (150) * (24) * (0.93) * (\text{tarifa en } \$ \text{ por Kw / h}) \\ &= (749952) * (\text{tarifa por Kw / h}) \text{ en } \$ \end{aligned}$$

Donde 150 son los días de operación de la zafra, 24 las horas de operación diarias, 0.93 es el tiempo de operación durante la zafra (asumiendo 7% de tiempo perdido durante todo el período).

Si asumimos una tarifa de \$ 0.45 por Kw / h

$$\text{La venta de energía en el periodo de zafra es} = (749952) * (\$ 0.45) = \mathbf{\$ 337,478.4}$$

**b) Eficiencia del sistema motor hidráulico.** Las eficiencias utilizadas son datos provistos por el fabricante del equipo. El sistema motor hidráulico esta formado por: motor eléctrico, bomba hidráulica, y motor hidráulico (Sección 1.5).

$$\text{Eficiencia motor eléctrico} = 0.98$$

$$\text{Eficiencia bomba hidráulica} = 0.6$$

$$\text{Eficiencia motor hidráulico} = 0.95$$

$$\mathbf{\text{Eficiencia del sistema} = 0.98 * 0.6 * 0.95 = 0.55}$$

#### 4.1.3. Sistema con motor hidráulico y motor AC

a) **Consumo y ahorro de vapor.** Para este caso el motor eléctrico sustituirá a la turbina de vapor. De los datos anteriores se sabe que el consumo de operación en promedio de la turbina es de 20,000 lb. vapor / hora.

Para el motor eléctrico la potencia de operación en promedio es de 385 Kw/h. Esta potencia eléctrica se debe transformar en lb. Vapor / hora y corresponderá al consumo de vapor para la operación del motor eléctrico.

El turbo generador necesita 16.5 lb. de vapor para generar 1 Kw. Por tanto

Consumo motor eléctrico = (16.5 Lb. Vapor / Kw)(385 Kw / h) = 6,352 lb. Vapor / hora

**Consumo total del sistema = (3,300 + 6,352) (lb. Vapor / hora) = 9,652 lb. Vapor / hora**

El ahorro de vapor se obtiene al restar del consumo de vapor de la turbina el consumo del sistema motor hidráulico y eléctrico AC.

(Consumo turbina – Consumo nuevo sistema) = ahorro de vapor

[20,000 – 9,652] (lb. Vapor / hora) = **10,348 lb. Vapor / hora**

Este ahorro de vapor se dispone para la venta de energía a la red nacional al utilizarlo en el turbo generador de 16.5 lb. de vapor / Kw. Y para calcularlo en kw se hace de la siguiente manera:

[10,348 lb. Vapor / hora] ÷ [16.5 lb. Vapor / Kw] = **627 Kw / hora**

En el período de zafra la venta de energía eléctrica debido al ahorro de vapor será de:

$$\begin{aligned} \text{Venta energía} &= (627 \text{ Kw / h}) * (150) * (24) * (0.93) * (\text{tarifa en \$ por Kw / h}) \\ &= (2099196) * (\text{tarifa por Kw / h}) \text{ en \$} \end{aligned}$$

Donde 150 son los días de operación de la zafra, 24 las horas de operación diarias, 0.93 es el tiempo de operación durante la zafra (asumiendo 7% de tiempo perdido durante todo el período).

Si asumimos una tarifa de \$ 0.45 por Kw / h

La venta de energía en el periodo de zafra es

$$(2099196) * (\$ 0.45) = \mathbf{\$ 944,638.2}$$

**b) Eficiencia del sistema motor eléctrico.** El sistema motor eléctrico (Sección 1.6), puede estar formado de la siguiente manera: 1) motor eléctrico, variador, y transformador de aislamiento; 2) motor eléctrico y variador. El transformador de aislamiento se utiliza dependiendo de la tecnología utilizada por el rectificador en el variador para cancelación de armónicos.

$$\text{Eficiencia motor eléctrico} = 0.95$$

$$\text{Eficiencia variador} = 0.98$$

$$\text{Eficiencia transformador} = 0.95$$

$$\mathbf{1) \text{ Eficiencia del sistema (con transformador)} = 0.95 * 0.98 * 0.95 = \mathbf{0.88}}$$

$$\mathbf{2) \text{ Eficiencia del sistema (sin transformador)} = 0.95 * 0.98 = \mathbf{0.93}}$$

#### 4.1.4. Resultados

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos. En la tabla III, se muestra el resultado para los tres sistemas sobre consumo de vapor, ahorro de vapor, y el valor en dólares de la venta de energía eléctrica a la red nacional debido al ahorro de vapor; en la tabla IV, se muestra el resultado de la eficiencia de la turbina de vapor, el sistema motor hidráulico, y el sistema motor eléctrico.

**Tabla III. Resultados de consumo y ahorro de vapor, y venta de energía eléctrica**

	Sistema turbina	Sistema turbina y motor hidráulico	Sistema motor hidráulico y eléctrico AC
Consumo de vapor	27,000 lb. vapor/h	23,300 lb. vapor/h	9,652 lb. vapor/h
Ahorro de vapor		3,700 lb. vapor / h	10,348 lb. vapor/h
Venta en \$ a red nacional eléctrica *		\$. 337,478.4	\$. 944,638.2

\* Se asume una tarifa de \$. 0.45 por Kw/h de energía eléctrica a la venta.

**Tabla IV. Resultados de eficiencias**

	Turbina	Sistema motor hidráulico	Sistema motor eléctrico
Eficiencia	0.55 – 0.65	0.55	0.88 – 0.93

## CONCLUSIONES

1. Se obtiene mejor control y monitoreo del equipo, de la operación del sistema y proceso, en la utilización de sistemas electrónicos con tecnologías actuales, gracias a los avances en el campo de electrónica, electricidad y comunicaciones principalmente.
2. Con la implementación de sistemas electrónicos en los procesos se puede obtener un control de operación local (cerca del proceso u operación) y a la vez un control de operación remoto en un cuarto de control (lejos del proceso u operación).
3. Los variadores de velocidad para mediana tensión han permitido que los motores eléctricos actualmente sean una alternativa más para la impulsión de molinos cañeros.
4. La distancia entre un motor síncrono y su variador de corriente directa esta limitado a unos cientos de metros debido a la caída de tensión producida por el aumento de la resistencia del cable con la distancia.
5. La distancia entre un motor de inducción y su variador de corriente alterna puede ser de hasta 15 Km.
6. El mantenimiento requerido para un motor de corriente directa debido a las escobillas es mayor al mantenimiento requerido para un motor de corriente alterna.

7. El total de distorsión de armónicas producido por un variador de corriente directa es mayor que el producido por variador de corriente alterna.
8. La necesidad de ahorrar en el consumo de vapor obliga a la búsqueda e implementación de sistemas más eficientes.
9. En la repotenciación de los molinos se obtiene el beneficio de aumentar la capacidad de molienda, y a la vez ahorro de vapor.
10. Sustituir la turbina de vapor por un motor eléctrico AC de mediana tensión aumenta la eficiencia energética del molino en un porcentaje significativo, lo que representa un ahorro considerable de energía.

## RECOMENDACIONES

1. Si se considera implementar una aplicación de variador de velocidad AC de mediana tensión y motor, se debe evaluar el espacio disponible, para espacios reducidos se puede utilizar un sistema compuesto por variador y motor AC de mediana tensión sin transformador de aislamiento.
2. Si se considera implementar una aplicación de variador de velocidad DC se debe tomar en cuenta la generación de armónicos, así como la limitante que existe en cuanto a la distancia máxima de separación entre el variador DC y el motor, debido a la caída de tensión en el conductor.
3. Si se necesita hacer una estimación del costo de la implementación de los sistemas electrónicos y equipo, tanto para el motor hidráulico como para el motor eléctrico, debe tomarse en cuenta un sistema de aire acondicionado necesario para la buena operación de los sistemas electrónicos.
4. La implementación de repotenciación de los molinos y la sustitución de las turbinas por motores eléctricos se pueden realizar a la vez en un mismo tiempo, ya que el retorno de inversión se puede recuperar en un periodo no mayor a 5 años.
5. Ya que cada molino opera a una potencia distinta, si se desea conocer en detalle y no de forma general el ahorro de vapor, se deben repetir los cálculos de ahorro de vapor para cada sistema de impulsión de molino.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Babcock and Wilcox Company. **Steam its generation and use**. 39ª ed., 3ª impresión. New York: Library of Congreso of Catalog, 1978. 36-22 pp.
2. George P. Meade. **Manual del azúcar de caña**. 9ª ed. Barcelona: Montaner y Simón, S.A. 1967. 940 pp.
3. HÄGGLUNDS DRIVES. **Documentation electronic control system for mills**. Agosto 2001. 10-41 pp.
4. HÄGGLUNDS DRIVES. **Documentation for spider control system**. Agosto 2001. 8-22 pp.
5. Lima Guzmán, Luis Enrique. "Drive de frecuencia variable en mediana tensión, aplicación en Ingenio La Unión s.a." **Revista de la asociación de técnicos azucareros de Guatemala**. (Guatemala) (abril-junio 2004): 12. 2004.
6. Rockwell Automation de Allen-Bradley. **Médium Voltaje AC Drive, Manual del usuario**. Julio 2002. 7-37 pp.
7. Rockwell Automation de Allen-Bradley. **Médium Voltaje AC Drive, Datos Técnicos**. Abril 2002. 129 pp.
8. Shinsky, Francis Grez. **Energy conservation through control**. New York: Academia Press, Inc., 1978. 321 pp.

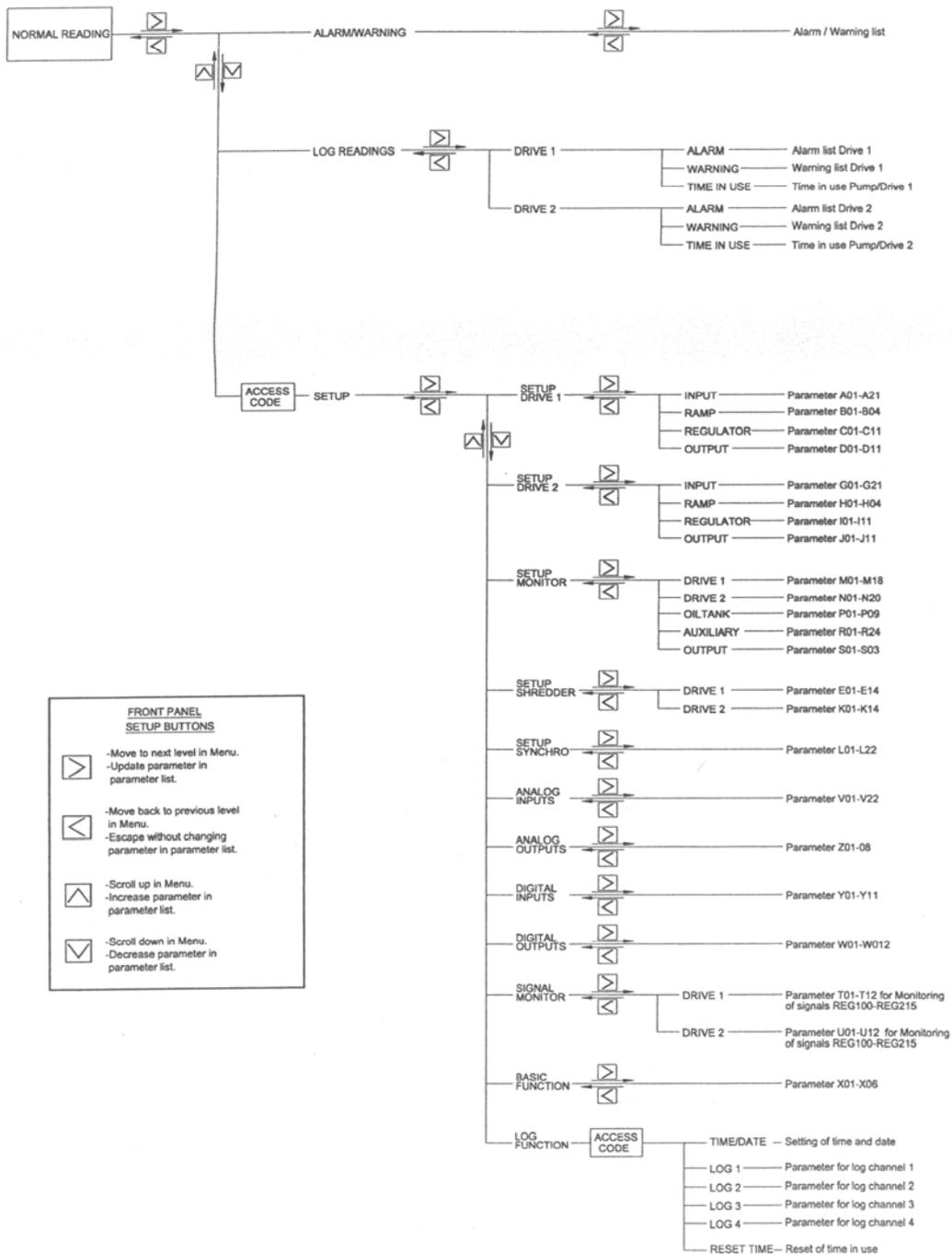
## ANEXO

**Figura 56.** Árbol de los parámetros configurables para el controlador local *Spider*

**Figura 57.** Árbol de menús de la interface del operador para el PF7000

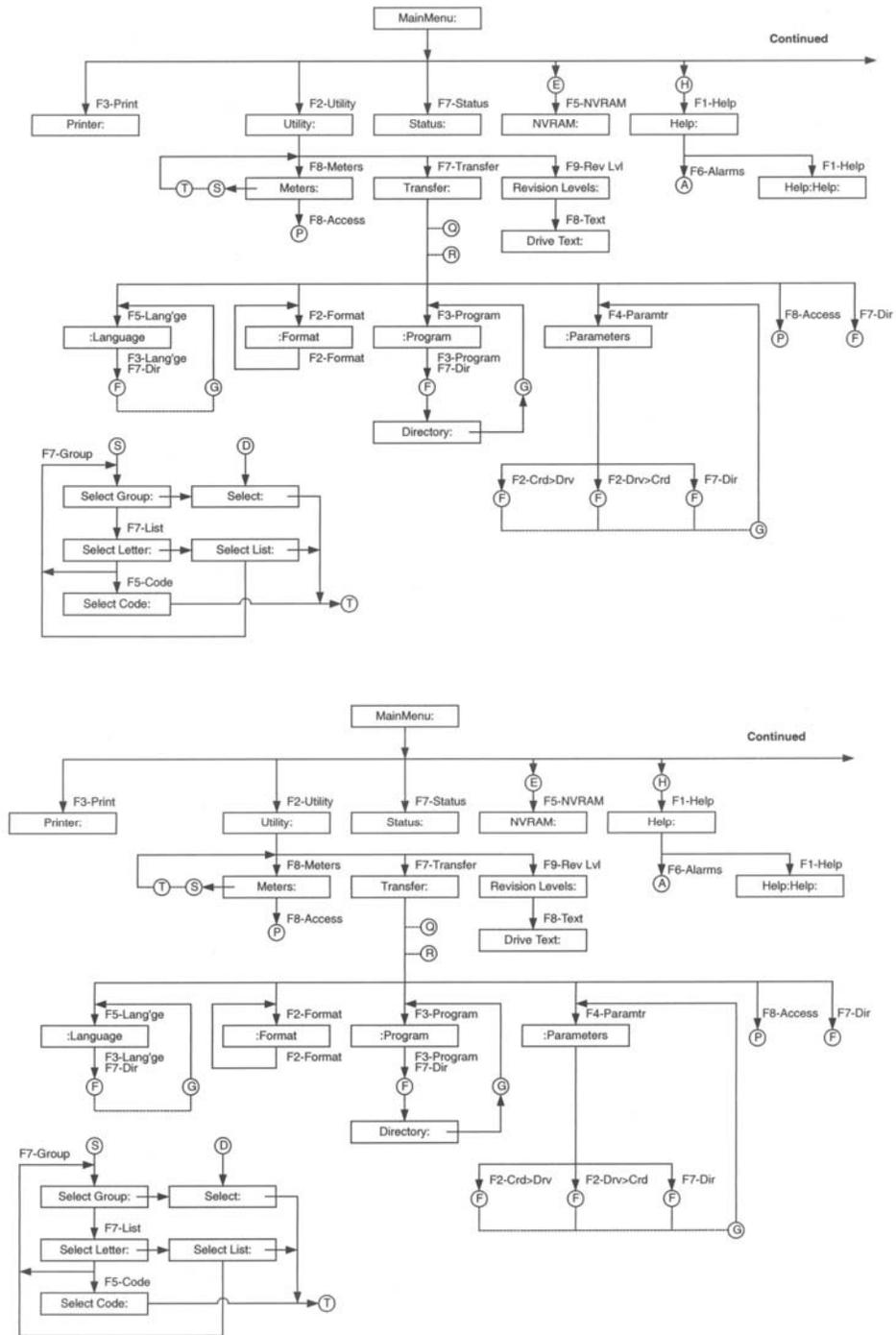
# Anexo

Figura 56. **Árbol de los parámetros configurables para el controlador local Spider.**



Fuente: **Hagglunds** Documentation for Spider control system

Figura 57. Árbol de menús de la interfase del operador para el PF7000



Fuente: **Manual de usuario** de variador de velocidad AC PF 7000, p. 3-79.