

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS DE POTENCIA Y CONTROL PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LA ETAPA DE LAMINACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE PLANCHAS DE ASBESTO CEMENTO EN ETERNIT S. A.”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**FREDDY JAVIER CRESPO ORTIZ  
ELENA DEL ROCÍO GORDÓN MOSQUERA**

**DIRECTOR: ING. PABLO ANGULO**

**Quito, Octubre 2007**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Freddy Javier Crespo Ortiz y Elena del Rocío Gordón Mosquera, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Freddy Javier Crespo Ortiz

---

Elena del Rocío Gordón Mosquera

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el siguiente trabajo fue desarrollado por Freddy Javier Crespo Ortiz y Elena del Rocío Gordón Mosquera, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Pablo Angulo**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## DEDICATORIA

***A Dios por recorrer junto a mí el camino que escogí. A mi madre y a mi padre por su amor, por su presencia, por sus palabras de aliento, por el apoyo incondicional que me han brindado siempre. A mis hermanas Paola, Gabriela, Irene por ser mis mejores amigas, mis compañeras del alma. A mis amigas y amigos por su presencia incondicional. A Javier porque tu amor y tú forma de ser siempre me dio fuerza para seguir adelante.***

***Elena***

## AGRADECIMIENTO

***A la Escuela Politécnica Nacional por los conocimientos adquiridos. Al Ing. Pablo Angulo por su confianza y por el trabajo realizado para la presentación de este proyecto de titulación.***

***Elena***

## DEDICATORIA

*A mis padres y a mi hermana por ser quienes desde siempre han confiado en mí y me han apoyado brindándome su cariño para poder cumplir mis objetivos.*

***Freddy***

## AGRADECIMIENTO

***A todos aquellos que con tan solo una palabra de aliento todo el apoyo que necesitaba. A la Escuela Politécnica Nacional, en especial al Ing. Pablo Angulo por confiar en nosotros. A Elenita porque más que una compañera ha sido mi mejor amiga.***

***Freddy***

## CONTENIDO

	Pág.
<b>CONTENIDO</b>	I
<b>PRESENTACION</b>	VI
<b>RESUMEN</b>	VIII
<b>CAPÍTULO 1</b>	
DESCRIPCION DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE TEJAS DE FIBROCEMENTO	2
1.1 INTRODUCCION	2
1.2 PROCESO DE ELABORACION DE PLANCHAS DE FIBROCEMENTO	3
1.2.1 BRIGADA DE MEZCLA	3
Desfibrador de pulpa	4
Molino de crisotilo	5
Cono mezclador de cemento	6
Tanques de agitación GEMI 1 Y GEMI 2	7
1.2.2 BRIGADA DE LAMINADO	9
Separadores de agua	9
Rodillo laminador	10
Moldeado de las planchas	14
Desmolde	15
<b>CAPÍTULO 2</b>	
DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA LAMINACION DE PLANCHAS DE FIBROCEMENTO	20
2.1 ANTIGUO SISTEMA DE FUERZA Y CONTROL	20



Circuito de fuerza	20
Circuito de control	21
2.2 NUEVO CIRCUITO DE FUERZA Y CONTROL	21
2.2.1 NUEVO CIRCUITO DE FUERZA	21
Interruptor automático	22
Variador de velocidad	24
Motor trifásico de inducción	25
Reductor de velocidad mecánico	26
2.2.2 NUEVO SISTEMA DE CONTROL	28
Lógica de operación	28
Control del variador de velocidad	28
<b>CAPÍTULO 3</b>	
DISEÑO DEL CIRCUITO DE FUERZA CONTROL	33
3.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES PARA EL DISEÑO	33
3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE FUERZA	34
Dimensionamiento del motor	34
Dimensionamiento del variador de velocidad	37
Dimensionamiento cables de fuerza	40
Protecciones	42
Especificaciones para el armario	43
3.3 LOGICA DE CONTROL	45
Control de arranque del motor	45
Control de velocidad	46
Alarmas, fallos y protecciones	48
<b>CAPÍTULO 4</b>	
DISEÑO DE LA INTERFAZ HOMBRE - MAQUINA	50
4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE INTOUCH	50
Intouch Application Manager	51
Window Maker	51

Window Viewer	51
4.1.2 REQUERIMIENTOS MINIMOS DE SISTEMA	51
4.2 LÓGICA DE MONITOREO	52
4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS VENTANAS DE LA HMI	53
4.3.1 PRESENTACIÓN	53
4.3.2 REGISTRO DE USUARIOS	54
4.3.3 PROCESO	56
4.3.4 LAMINADO	58
Gráficas	58
Históricos	59
Alarmas y Eventos	60
4.4 COMUNICACIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD CON INTOUCH	61
4.4.1 PROTOCOLO MODBUS	62
MODO ASCII	64
MODO RTU	64
4.4.2 CONFIGURACIÓN DEL I/O SERVER	66
Configuración del Puerto de Comunicaciones	66
Configuración del Topic	67
Configuración del Servidor de Datos	69
4.4.3 CONFIGURACION DE ITEMS EN INTOUCH	70
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>MONTAJE, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA</b>	<b>74</b>
5.1. MONTAJE E INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS	74
Variador de velocidad	75
Interruptor automático	84
Panel de Control de Operador	86
5.2 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA	87
5.3 COSTOS DEL PROYECTO	89

**CAPÍTULO 6**

ANÁLISIS DEL TORQUE DE CARGA DEL MOTOR	91
6.1 DEFINICIONES	91
Deslizamiento	91
Torque	92
Corriente del motor	94
Potencia activa del motor	95
Tipos de carga	95
6.2 METODOS DE CONTROL DE VELOCIDAD	98
6.2.1 CONTROL DE FRECUENCIA CON PWM	98
Ventajas	99
Desventajas	99
6.2.2 CONTROL DEL VECTOR DE FLUJO MEDIANTE PWM	100
Ventajas	100
Desventaja	101
6.2.3 CONTROL DIRECTO DE TORQUE DTC	101
6.3 APLICACIÓN DE VARIADORES CON TECNOLOGÍA DTC	102
OPERACIÓN DEL SISTEMA DURANTE EL ARRANQUE	104
Rodillo laminador 1 (2 toneladas)	104
Rodillo laminador 2 (5 toneladas)	105
OPERACIÓN DEL SISTEMA EN RÉGIMEN PERMANENTE	107
Rodillo laminador 1 (2 toneladas)	107
Rodillo laminador 2 (5 toneladas)	111
6.4 RESUMEN DE RESULTADOS	114

**CAPÍTULO 7**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
7.1 CONCLUSIONES	117
7.2 RECOMENDACIONES	120

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	123
<b>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS</b>	125
<b>ANEXO A</b>	
DIAGRAMA UNIFILAR DEL CIRCUITO DE FUERZA	A-1
<b>ANEXO B</b>	
ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS	B-1
<b>ANEXO C</b>	
PARAMETROS DE CONFIGURACION DEL VARIADOR DE VELOCIDAD	C-1
<b>ANEXO D</b>	
MANUAL DE USUARIO DRIVE WINDOW	D-1
<b>ANEXO E</b>	
LAYOUTS DE LA PLANTA	E-1

## PRESENTACIÓN

Actualmente la industria ecuatoriana busca un constante mejoramiento de los procesos, por lo que la automatización de los mismos a través de las nuevas tecnologías desarrolladas por el área electrónica es la mejor alternativa para alcanzar estos objetivos.

Eternit S.A. dentro del plan de modernización de su planta decidió adoptar las nuevas tecnologías como solución de automatización de la etapa de laminación de planchas de fibrocemento y además decidió cambiar el motor principal del proceso.

El nuevo sistema de accionamiento esta compuesto por un interruptor automático con relé electrónico de protección, un variador de velocidad que trabaja con la tecnología de control directo de torque DTC, un motor trifásico de inducción y una caja reductora de relación fija que eleva el torque y reduce la velocidad.

La lógica de control requerida por Eternit S.A. se cumplió en su totalidad utilizando la tarjeta de control RMIO que forma parte del variador de velocidad, cuya programación puede igualar a la de un controlador lógico programable PLC.

La interfaz hombre – máquina desarrollada como una alternativa de software amigable y de fácil uso, se lo realizó debido al interés mostrado por Eternit S.A. para que la misma sea tomada como una posibilidad de comunicación con el proceso, de forma que se pueda visualizar las variables más importantes en cada proceso como corriente, velocidad, torque, etc. de las que se puedan generar históricos como respaldo en el caso de ocurrir fallas en el accionamiento.

Usando el software Drive Window propietario de ABB Ecuador S.A., que se comunica con el variador de velocidad a través de un enlace de fibra óptica, se tomaron curvas de velocidad, torque y corriente tanto en funcionamiento normal como en el arranque

y con un desarrollo matemático se realizó un estudio del torque de la carga del motor, con el objeto de conocer como reacciona el sistema de rodillos ante los cambios de cargas y sus límites en los que el sistema pueda entregar todo su potencial.

## RESUMEN

Para desarrollar el trabajo de una manera adecuada, se lo dividió en siete capítulos que se describen a continuación:

**CAPITULO 1:** Es una descripción general del proceso de elaboración de tejas de fibrocemento, el cual se encuentra dividido en dos grandes etapas: la primera que se denomina de mezcla incluye la preparación y dosificación de la materia prima y la segunda que mediante los rodillos laminadores descritos a detalle y la moldeadora comprenden el laminado de la teja de fibrocemento.

**CAPITULO 2:** Se explica el antiguo circuito de fuerza y sistema de control de modo que se tenga una idea de los cambios realizados y se detallan los equipos nuevos del circuito de fuerza y control.

**CAPITULO 3:** Se presenta una completa descripción de las consideraciones preliminares para el diseño, el dimensionamiento del circuito de fuerza y la lógica de control.

**CAPITULO 4:** Desarrollo de la HMI (Interfaz hombre – máquina), exponiéndolo como una alternativa de software para la supervisión y adquisición de datos a través de un ambiente amigable, también se detalla su programación y como se debe operar con el sistema.

**CAPITULO 5:** Se explica los pasos que se siguieron para el montaje e instalación tanto del variador de velocidad como del interruptor automático y se explica como se realizó la puesta en marcha del sistema con sus respectivas pruebas.

**CAPITULO 6:** Se exponen las definiciones básicas de las variables eléctricas del motor de inducción de corriente alterna así como una descripción y comparación de

la tecnología de control DTC con las otras formas de control. Igualmente en este capítulo se presenta un estudio del torque de carga del motor.

CAPITULO 7: Conclusiones que surgieron durante el desarrollo del proyecto y recomendaciones tanto para el correcto funcionamiento del área automatizada como los requerimientos de software y hardware que se puede usar a futuro para una automatización total del sistema.

ANEXOS: Detalle de las especificaciones técnicas y curvas de los equipos, diagramas eléctricos, programación del variador de velocidad.



# CAPÍTULO 1

# **DESCRIPCION DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE TEJAS DE FIBROCEMENTO**

## **1.1 INTRODUCCION**

La empresa de fibrocemento ETERNIT S.A. situada en la panamericana sur km. 14 ½ de la ciudad de Quito es la fábrica de asbesto-cemento más antigua del país, fundada el 20 de Agosto de 1958 en la ciudad de Guayaquil y cuya actividad productiva estaba orientada a la fabricación de productos de cemento reforzado con fibras minerales.

En 1974 se instaló en la ciudad de Quito una nueva planta con la misma línea de producción que su similar en Guayaquil. En 1982 luego de una gran inversión económica se renueva la tecnología y maquinaria de la fábrica de la ciudad de Quito, constituyéndose en la primera y única planta del país que produce planchas de cemento y fibras minerales mediante un control avanzado para esos días.

Las líneas que se producen son: cubiertas de fibrocemento, placas planas y tanques plásticos.

Las cubiertas de fibrocemento vienen en diferentes tipos, que dependen del grosor, del largo, del ancho y del número de crestas, entre las cuales existen teja ondulada 1000, teja ondulada P7, teja barroca, canaleta 90, canaleta 43, teja española, etc.



Figura 1. 1 Cubiertas de fibrocemento

## **1.2 PROCESO DE ELABORACION DE LAS PLANCHAS DE FIBROCEMENTO.**

Para la formación de una plancha se requiere de una mezcla o pasta homogénea de cemento, celulosa, crisotilo y agua en cantidades preestablecidas; de modo que la consistencia del producto terminado, cumpla con los requerimientos de resistencia a impactos y permeabilidad determinados.

El proceso de producción de planchas de fibrocemento está compuesto de dos grandes etapas conocidas como la brigada de mezcla y la brigada de laminado.

### **1.2.1 BRIGADA DE MEZCLA**

La brigada de mezcla es la encargada de obtener la pulpa óptima, para la formación de la plancha de fibrocemento, a partir de las materias primas. La misma abarca las operaciones que se llevan a cabo en el pulper, molino, cono mezclador, tanques GEMI 1 y 2. Tal como se ilustra en la figura 1.17, Pág. 17

### *Desfibrador de pulpa*

El proceso comienza con la introducción manual de una cantidad de cartón (celulosa) previamente pesada en un tanque de una capacidad aproximada de 45 m<sup>3</sup> provisto de una espas, conocido como pulper (figura 1.17, Pág. 17, detalle 1), que se encarga de desmenuzar el cartón, para lo cual se requiere agregar agua en cantidad dosificada dependiendo del peso del cartón. Con la ayuda de una bomba hidráulica se puede recircular la mezcla y refinarla hasta obtener la consistencia adecuada.



Figura 1. 2 Pulper y tanque dosificador de agua

A través de tuberías la pasta es enviada a un tanque desfibrador para abrir aun más la fibra a través de una constante agitación. Entonces la celulosa estará lista para ser cargada en su respectivo dosificador.



Figura 1. 3 Fibra de cartón

### *Molino de crisotilo*

Simultáneamente a la preparación de la celulosa en un molino de piedras accionado por un motor de inducción (figura 1.17, Pág. 17, detalle 2) se muele crisotilo mezclado con agua y se obtiene una mezcla sin grumos que ingresa por tuberías a un tanque de almacenamiento y pesaje, para luego ser enviada al tanque principal de mezcla GEMI 1.



Figura 1. 4 Crisotilo al ingreso del molino

#### *Cono mezclador de cemento*

El cono mezclador IMI (figura 1.17, Pág. 17, detalle 3) es un tanque de aproximadamente 70 m<sup>3</sup> de capacidad , donde se mezcla, cemento, agua y material seco molido proveniente de productos defectuosos o rotos, la cual es bombeada al tanque GEMI 1 en cantidades establecidas de acuerdo a la receta del producto a fabricarse.

El cemento se encuentra almacenado en dos silos de 150 toneladas cada uno, y pasa a través de bandas transportadoras tipo oruga a una tolva para ser pesado y descargado al cono mezclador.



Figura 1. 5 Silos de cemento

### *Tanques de agitación GEMI 1 Y GEMI 2*

Las mezclas preparadas indicadas anteriormente, son trasladadas por tuberías independientes hasta el tanque GEMI 1, en el que se unen formando una pasta de cemento, crisotilo, celulosa y agua, a la que se añade carbonato de calcio.

La dosificación de la mezcla de la materia prima se la realiza en los porcentajes indicados a continuación: 70% de cemento, 20% de carbonato de calcio (complemento de estabilidad del cemento), 2% Celulosa (solo cartón), < 8% crisotilo (asbesto), 2% de material seco recuperado del proceso.



Figura 1. 6 Pasta final de fibrocemento

Los dosificadores de las mezclas poseen sensores de nivel los cuales mandan una señal al sistema de control y este define la secuencia y los tiempos de agitación. Un doble control es realizado entre tiempos y volúmenes (niveles de celdas y sensores de carga), de esta forma se valida la información.

Posteriormente la mezcla pasa al tanque GEMI 2 donde se continúa agitándola para evitar que fragüe. En caso necesario se añade agua a la mezcla.

Los tanques GEMI 1 y GEMI2 (figura 1.17, Pág. 17, detalle 5) son recipientes metálicos, de forma cilíndrica vertical, en cuyo fondo se encuentra un rotor o rodete, acoplado a un motor eléctrico. El continuo accionar de dicho rotor origina que los diferentes materiales en estado sólido se desintegren completamente produciendo una pasta más homogénea, libre de grumos.



## 1.2.2 BRIGADA DE LAMINADO

La brigada de laminado es la encargada de fabricación de planchas planas, esta abarca las operaciones que se llevan a cabo en los separadores de agua, el rodillo laminador, el moldeado de las planchas y el desmolde. Tal como se ilustra en la figura 1.18, Pág. 18.

### *Separadores de agua*

La pasta proveniente de los tanques GEMI 1 y GEMI 2 lleva un exceso de agua, para cuya eliminación se la ingresa a un sistema de tanques (cinco en total) (figura 1.18, Pág. 18, detalle 1) cada uno provisto de un cilindro que al girar separa la pasta del agua.

Por efecto de la rotación del cilindro la pasta se adhiere a una banda de fieltro que la transporta hacia el rodillo de formación (figura 1.18, Pág. 18, detalle 2). El agua es almacenada en tanques para ser utilizada nuevamente en las etapas necesarias del proceso.



Figura 1. 7 Motores de agitadores de los tanques separadores

Cada tanque separador está provisto de cuatro agitadores que evitan que se fragüe el cemento.

Se realiza un mantenimiento semanal de lavado y secado del fieltro con duchas surtidoras de agua a presión y luego se secan con bombas de vacío. Debido a que la banda de fieltro se desgasta por fricción y porque el cemento es un material abrasivo, es necesario cambiarla cada mes.



Figura 1. 8 Banda de Fieltro

### *Rodillo laminador*

Es la máquina más importante del proceso y se encarga de formar la plancha de fibrocemento que sirven de base para elaborar las distintas líneas de productos.

Consiste de un motor de 125 kW (estandarizado) a cuyo eje se acopla una caja reductora de velocidad que mueve un sistema de dos rodillos (figura 1.18, Pág. 18, detalle 3) el pequeño mueve la banda de fieltro y el más grande se encarga de formar la plancha.

Dependiendo de la línea de productos a fabricar se requieren distintas dimensiones de la plancha, para cuya formación se utilizan rodillos de diferente diámetro.



Figura 1. 9 Rodillos laminadores utilizados

Debido a que para el cambio de rodillo se requiere el trabajo especializado y al rededor de ocho horas, se debe programar la producción con el mantenimiento a fin de aprovechar el paro forzoso en la mejor forma.

La pasta separada del agua y transportada por la banda de fieltro se adhiere al rodillo que por cada giro incrementa el espesor en aproximadamente 1 mm, de tal suerte que, dependiendo del tipo de producto, se establece el número de giros y la velocidad.

Cuando las capas han formado una plancha compacta del grosor requerido, el cual se muestra en un indicador tipo reloj, ésta es cortada con una acción manual del el operador que se guía por dicho indicador.

Las planchas continúan en la banda transportadora y para garantizar el ancho exacto se cortan utilizando cuchillas circulares, ubicadas antes de que la plancha ingrese a la siguiente etapa del proceso.



Figura 1. 10 Rodillo laminador, caja reductora y motor de inducción



Figura 1. 11 Cuchillas de corte lateral

Tanto los sobrantes del corte lateral como el material mal formado, determinado por el operador de la moldeadora, se almacenan en un tanque para ser agitados y disueltos con agua y reintroducidos en el proceso de mezcla en el tanque (figura 1.17, Pág. 17, detalle 4)



Figura 1. 12 Tanque de material sobrante de las planchas

### *Moldeado de las planchas*

La plancha plana tiene una consistencia pastosa que permite que sea conformada de acuerdo a los requerimientos del producto final, para lo cual usando un sistema neumático de ventosas se apilan en forma alternada planchas y láminas formadoras en una especie de sándwich de 42 capas que se transportan en coches hacia el horno (figura 1.18, Pág. 18, detalle 3), donde se secan y fraguan adquiriendo dureza y resistencia.



Figura 1. 13 Máquina moldeadora de planchas

El producto final tipo cubierta, mejor conocido como teja, se fragua dentro del horno que usa vapor, es decir, en un ambiente tipo sauna se secan con un flujo en movimiento que va a lo largo del túnel. Esta parte del proceso dura alrededor de 8 horas. (Figura 1.18, Pág. 18, detalle 5)



Figura 1. 14 Ingreso de coches al horno

El horno está compuesto por dos calderos que en conjunto tienen una capacidad de calentamiento de 80 grados centígrados.

### *Desmolde*

Para el desmolde se utiliza un sistema neumático de absorción por ventosas, colocando las láminas formadas una sobre otra para ser almacenadas al aire libre mientras que los moldes regresan para continuar con el proceso de moldeo de las planchas. (Figura 1.18, Pág. 18, detalle 6)



Figura 1. 15 Desmolde de planchas

Durante el conformado del lote se va inspeccionando y separando cada teja que presente defectos. Se las coloca al aire libre para que terminen de fraguarse en un periodo aproximado de siete días, pasado este tiempo se realiza un control de calidad para comprobar la resistencia y permeabilidad requerida para su venta.



Figura 1. 16 Producto al aire libre



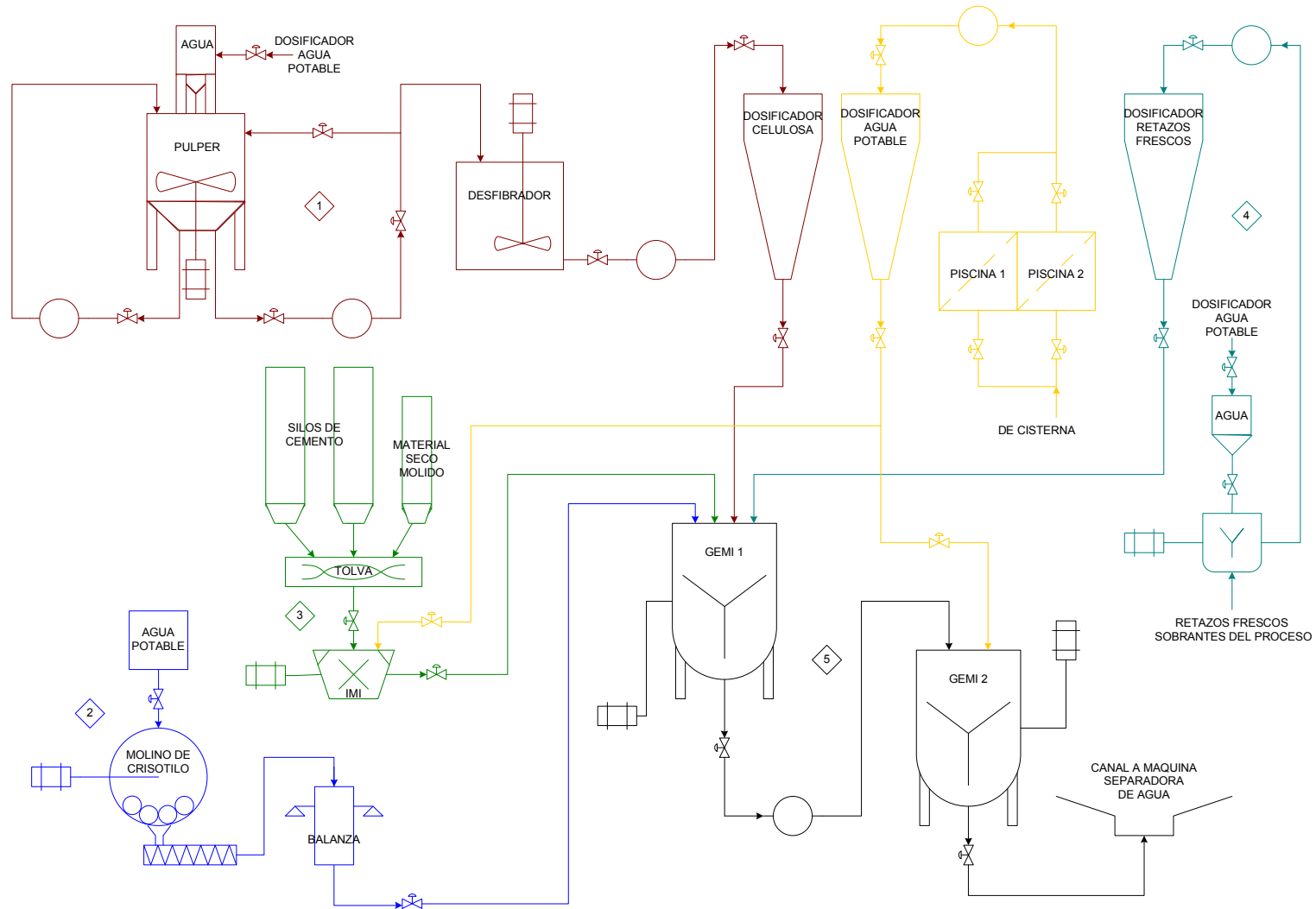


Figura 1. 17 Etapa de mezcla

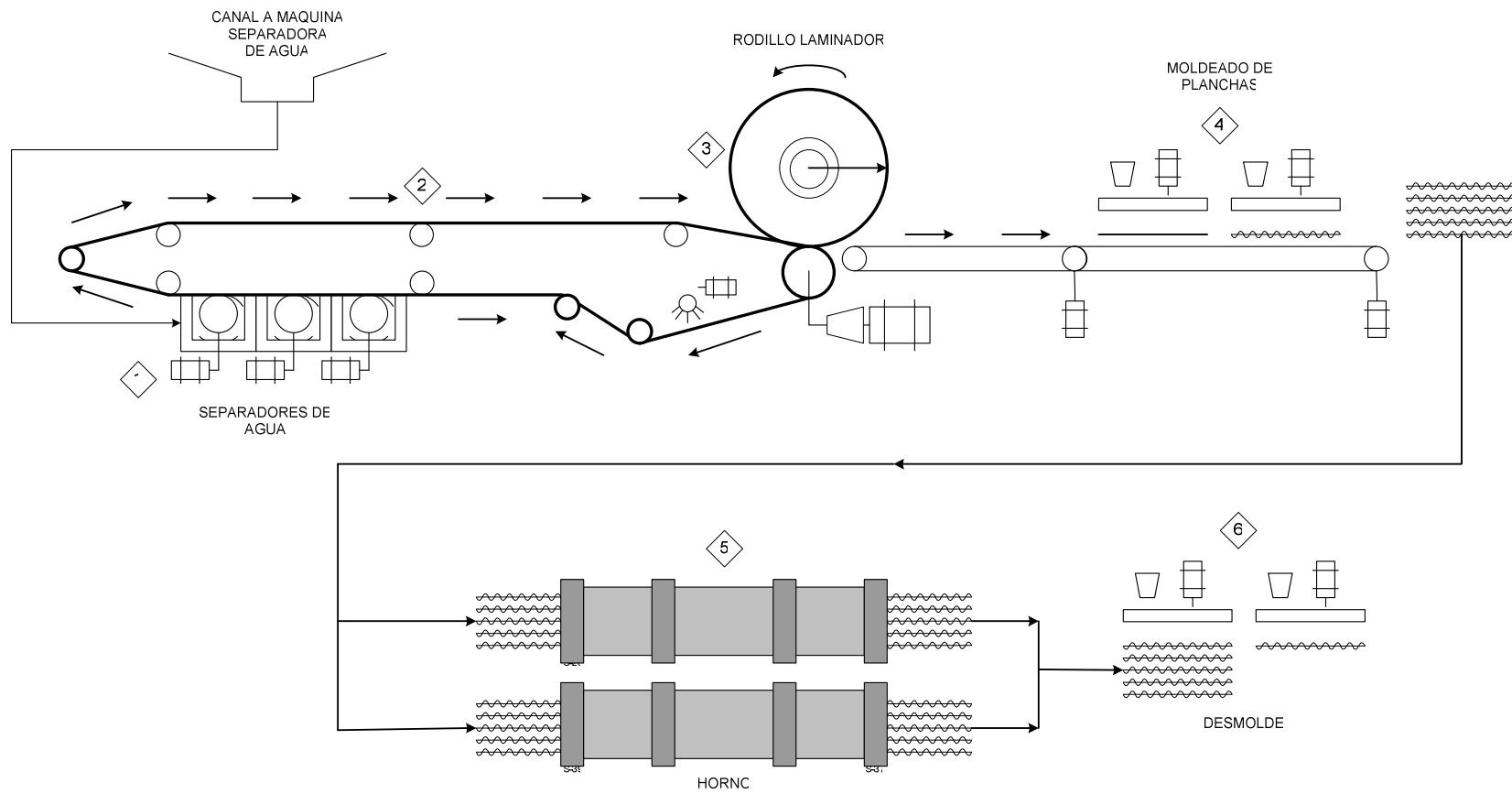


Figura 1. 18 Etapa de laminado

# CAPÍTULO 2

## DESCRIPCION DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA LAMINACION DE PLANCHAS DE FIBROCEMENTO

### 2.1 ANTIGUO SISTEMA DE FUERZA Y CONTROL

#### *Circuito de fuerza*

Los rodillos del sistema de laminación estaban movidos por un motor trifásico, provisto de un arranque estrella - delta controlado por elementos electromecánicos, que habían cumplido su vida útil. Los datos de placa del motor son los siguientes:

Descripción	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (HP)	Velocidad (rpm)	Factor de Potencia
Motor de accionamiento de rodillo	460	80	75	1750	0.88

El acoplamiento entre el eje del motor eléctrico y los rodillos se lo hacía mediante un sistema mecánico que permitía tanto reducir la velocidad del motor de alrededor de 1750 RPM a 60 RPM como variarla de acuerdo a los requerimientos por medio de un conjunto de poleas de diámetro variable y un ingenio mecánico accionado por el operador.

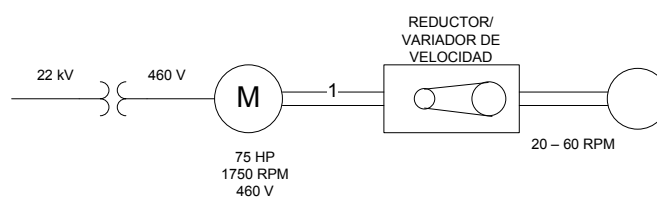


Figura 2. 1 Antiguo sistema de fuerza

### *Circuito de control*

El sistema de rodillos era operado desde un tablero de control, en el cual un operador podía encender o apagar al motor y variar la velocidad del rodillo mediante pulsantes que cambiaban la relación de diámetros de las poleas dentro de la caja reductora de velocidad.

Un sensor colocado junto a los dos rodillos medía la separación entre estos y enviaba esta información a un indicador analógico tipo reloj en el que el operador podía verificar si las condiciones de funcionamiento del sistema eran las requeridas para conseguir el espesor deseado.

Para verificar el correcto espesor de las planchas, los operadores de la etapa de laminado lo verificaban usando un calibrador mecánico, tipo pie de rey.

## **2.2 NUEVO CIRCUITO DE FUERZA Y CONTROL**

### **2.2.1 NUEVO CIRCUITO DE FUERZA**

El circuito de fuerza se cambió en su totalidad aprovechando la actual tecnología que permite variar fácilmente la velocidad de los motores de inducción, de tal manera que se adquirió un nuevo motor, un interruptor automático, y un variador de velocidad, para el control de la velocidad.

Debido a que el proceso requiere un elevado torque a muy bajas velocidades, se adquirió un reductor de velocidad mecánico de relación fija 24.1 a 1 para acoplarlo al eje de los rodillos.

De esta manera la velocidad de los rodillos se puede controlar variando directamente la frecuencia de alimentación al motor de inducción, sin necesidad de elementos mecánicos, puesto que el reductor de velocidad es fijo.

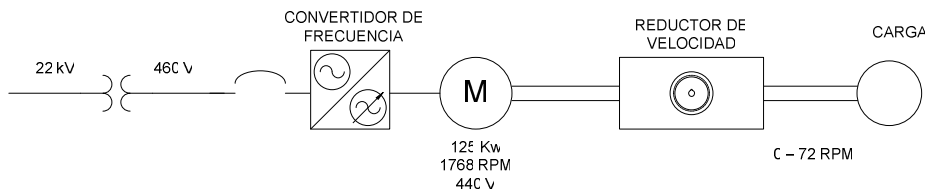


Figura 2. 2 Nuevo sistema de fuerza

### *Interruptor automático*

Para el empleo en corriente alterna y como protección para un variador de velocidad el interruptor automático está equipado con un relé de máxima corriente y tecnología electrónica, la cual permite obtener funciones de protección con elevada fiabilidad, precisión de las actuaciones e inmunidad a la temperatura y a las componentes electromagnéticas conforme a las normas.

La alimentación del relé electrónico se toma directamente de sensores amperimétricos integrados en el interruptor, lo que garantiza el disparo en cualquier situación, incluso con ajuste al mínimo.

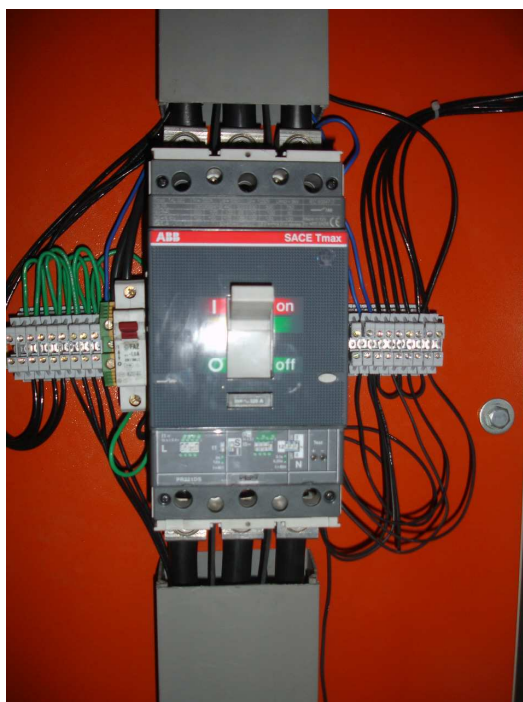


Figura 2. 3 Protección del nuevo circuito de fuerza

El relé electrónico PR221DS del interruptor automático T4 de ABB Fig. 2.3, realiza la función de protección contra la sobrecarga L y el cortocircuito S/I (versión PR221DS-LS/I Fig. 2.4). Con esta versión es posible elegir, desplazando el dip-switch correspondiente, si se desea disponer de la protección contra el cortocircuito a tiempo inverso retardado S o la protección instantánea I.

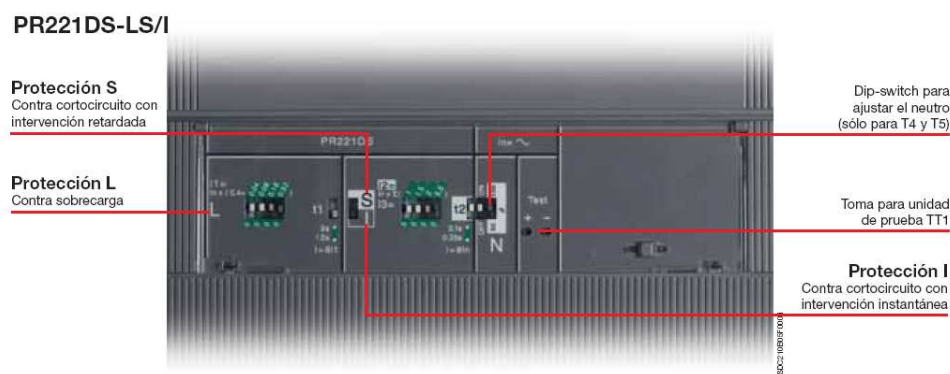


Figura 2. 4 Relé electrónico PR221DS-LS/I

La regulación es única para las fases y el neutro, es posible programar el umbral de protección del neutro en OFF, 50% o 100%, directamente desde la parte frontal del relé mediante el correspondiente dip-switch.

El interruptor contiene contactos auxiliares en su interior, los cuales indican el estado del interruptor como: abierto, cerrado o en estado de disparo.

Adicionalmente, dentro del interruptor automático se colocó un relé de mínimo voltaje – UVR, el cual dispara automáticamente al interruptor por falta total de voltaje de alimentación del relé o por disminución de la tensión a valores inferiores de  $0,7 \times U_n$  (voltaje nominal de alimentación), con un campo de actuación de  $0,7$  a  $0,35 \times U_n$ . La idea principal de colocar este relé, es la de proteger al variador de velocidad de un posible pico de voltaje cuando retorna el suministro de energía eléctrica luego de haberse producido un corte del mismo.

Después de la actuación del UVR es posible volver a cerrar el interruptor a partir de una tensión superior a  $0,85 \times U_n$ . Con el relé de mínimo voltaje no energizado, no es posible el cierre del interruptor ni de los contactos principales.

#### *Variador de velocidad*

Un variador de velocidad permite convertir una señal trifásica senoidal de voltaje de frecuencia fija (60Hz para el Ecuador), en una señal de voltaje trifásica de amplitud y frecuencia variable, la cual al ser aplicada a un motor de inducción varía la velocidad del mismo hasta alcanzar sus condiciones nominales, sin afectar el torque.

A fin de optimizar el comportamiento dinámico del motor, en esta aplicación se ha utilizado la tecnología conocida como DTC (Control Directo del Par).



La tecnología DTC permite utilizar el par y el flujo del estator del motor como variables de control principales, las que se obtienen directamente del propio motor. Por tanto, los requerimientos de una respuesta inmediata a los cambios de torque por oscilaciones de la carga que puedan darse en el proceso sin alterar la velocidad, se cumplen sin necesidad de un dispositivo de retroalimentación, como por ejemplo un encoder o un tacómetro.



Figura 2. 5 Variador de velocidad ABB

### *Motor trifásico de inducción*

Cuando un motor trifásico va a trabajar con un variador de velocidad debe cumplir los siguientes requerimientos:

El aislamiento de los devanados del motor debe ser capaz de soportar los impulsos parásitos y cambios rápidos de tensión de salida del inversor, por lo que se requiere que contengan un barniz especial como estándar desde su fabricación.

Reducir la corriente de fuga de capacitancia, las pérdidas de alta frecuencia y las corrientes de los cojinetes del motor usando filtros du/dt en el caso de que el motor con el que se va a trabajar tenga una vida útil elevada.

Debido a que el antiguo motor (52 Kw.) no cumplía estos requerimientos y considerando además que en la fábrica se tenía programado un aumento de la producción, se decidió adquirir un nuevo motor trifásico de inducción de 125 Kw., 440 V AC.

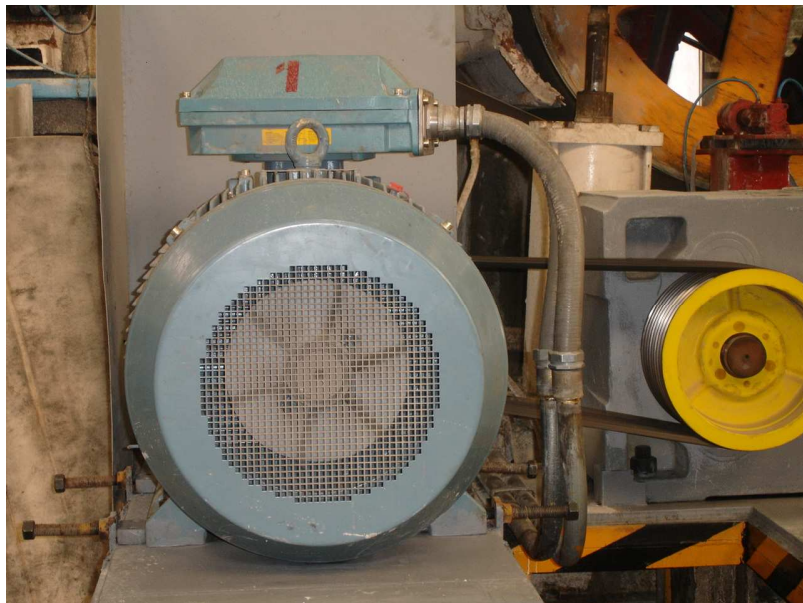


Figura 2. 6 Nuevo motor de inducción ABB

#### *Reductor de velocidad mecánico*

Cuando un motor eléctrico provisto de un sistema electrónico de control de velocidad se acopla directamente a una carga que requiere bajas velocidades y alto torque, es necesario sobredimensionar su potencia para poder suministrar el torque en condiciones adecuadas.

Por esta razón se decidió usar una caja mecánica reductora de velocidad que se acopló al eje del motor por medio de bandas. De acuerdo a la relación de acoplamiento, el torque en el lado de la carga se eleva y la velocidad se reduce en la misma proporción, cumpliendo con la ecuación:

$$P_1 = P_2$$

$$T_1 \times \omega_1 = T_2 \times \omega_2$$

$$T_2 = T_1 \times \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

$$n = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

$P_1$  = potencia del motor

$P_2$  = potencia de la carga

$T_1$  = torque del motor

$T_2$  = torque de la carga

$\omega_1$  = velocidad del motor

$\omega_2$  = velocidad de la carga



Figura 2. 7 Nuevo motor y caja reductora

Para el caso se requiere que los rodillos se muevan a una velocidad continua entre 20 – 80 rpm; lo que implica que el eje del motor trifásico de inducción debe girar entre 480 – 1930 rpm regulado por el variador de velocidad; siendo la caja mecánica reductora de velocidad la encargada de acoplar el motor a la carga.

## **2.2.2 NUEVO SISTEMA DE CONTROL**

### *Lógica de operación*

El variador de velocidad ABB modelo ACS800-02-0210-5 que se usó en este proyecto, trabaja con un software y hardware que se asemeja al funcionamiento de un PLC y que permite ingresar numerosas variables tanto analógicas como digitales en base de las cuales se puede implementar un control avanzado pues posee bloques matemáticos, funciones lógicas, controles PID, con lo cual se puede automatizar completamente esta etapa del proceso.

Sin embargo, por decisión de los responsables de la producción en la fábrica se mantuvo la lógica de operación anterior, cambiando únicamente el sistema de arranque del motor y el método de variación de velocidad de los rodillos, tal como se describió en el apartado del circuito de control antiguo.

### *Control del variador de velocidad*

El variador de velocidad ABB de la serie ACS800, permite el control del proceso desde el panel alfanumérico de 4 líneas x 20 caracteres y mensajes de texto, que se encuentra en la parte frontal del equipo; desde la tarjeta de control de entradas y salidas, RMIO, que se detalla más adelante; o desde un control de bus de campo con el módulo adaptable de comunicación Modbus con protocolo RTU a través de la HMI Intouch.



Figura 2. 8 Panel para programación del variador de velocidad

El control que ofrece el variador de velocidad desde la tarjeta de control es comparable al de un controlador lógico programable (PLC) y suficiente para la presente aplicación.

La tarjeta de control RMIO esta compuesta de: tres entradas analógicas, una entrada de tensión diferencial programable y dos entradas de corriente diferenciales programables, dos salidas analógicas de corriente programables, una salida constante de tensión (24 VDC), seis entradas digitales programables, tres salidas de relé programables y una entrada de alimentación de 24 VCC.

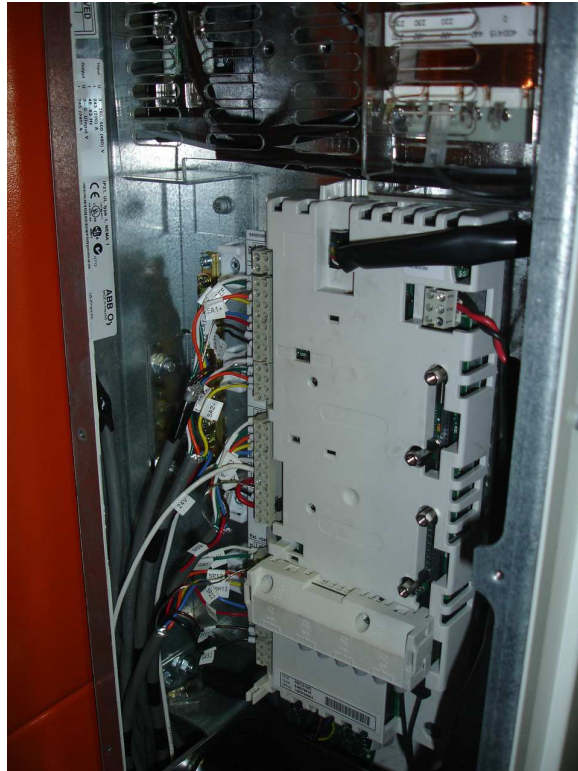


Figura 2. 9Tarjeta de control RMIO

Junto al rodillo laminador de planchas de fibrocemento, se tiene el panel de control del operador, a una distancia de cableado por tubería aproximado de 15 metros al cuarto del control, donde se encuentra el armario con el variador de velocidad y sus protecciones.

El panel de control está compuesto por dos pulsantes, uno de marcha y uno de parada, un hongo de parada de emergencia, un potenciómetro de precisión para variar la velocidad y un indicador digital.

Para reducir el efecto de las perturbaciones en las señales de control se usaron cables apantallados. La pantalla se debe aterrizar para evitar el efecto de una corriente circulante, voltajes inducidos o ruido que podrían afectar a dichas señales.



Figura 2. 10 Panel de control junto al proceso

# CAPÍTULO 3



## **DISEÑO DEL CIRCUITO DE FUERZA CONTROL**

### **3.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES PARA EL DISEÑO**

El dimensionado de un sistema de accionamiento es una tarea en la que todos y cada uno de los factores que la integran deben ser tenidos en cuenta detenidamente, incluyendo el suministro eléctrico, la máquina impulsada mediante el accionamiento, las condiciones ambientales, la caja reductora, etc. El tiempo invertido en esta fase puede traducirse en un considerable ahorro de costos.

Las consideraciones preliminares que se tomaron en cuenta para el dimensionamiento del sistema de accionamiento fueron:

- El suministro de energía eléctrica está compuesto de un transformador de ...KVA con relación de voltajes de 22000 V AC a 460 V AC 60 Hz, seguido de un breaker de protección hacia las barras de distribución de energía eléctrica a la planta, los cables con su respectiva protección que se dirigen al cuarto de control sin superar una distancia de alimentación de 30 metros. Tal como se ilustra en el anexo A-1
- La carga para el sistema de accionamiento comprende un rodillo cilíndrico que da el movimiento a la banda de fieltro y al rodillo que lamina las planchas de fibrocemento. Tal como se ilustra en la figura 1.18, Pág. 18, detalle 2 y 3.
- Tomando en cuenta la carga descrita, es preciso disponer de un torque de arranque elevado para poder vencer la inercia del sistema al arrancar, mientras que en régimen permanente el torque se mantendrá constante.
- El control de velocidad en un rango de trabajo desde 20 rpm hasta 80 rpm es un factor importante en la elaboración de las planchas de fibrocemento.

- Otra consideración muy importante para este proyecto, es que fue realizado bajo un contrato entre la fabrica ETERNIT S. A. y la compañía ABB Ecuador, razón por la cual los criterios de selección y diseño fueron los correspondientes a esta marca.

### **3.2 DISEÑO DEL CIRCUITO DE FUERZA**

El sistema de accionamiento de corriente alterna consta del suministro de energía eléctrica, las protecciones, un variador de velocidad, un motor de inducción, una caja reductora fija y una carga.

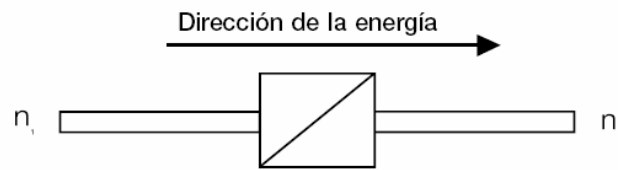
#### *Dimensionamiento del motor*

El motor eléctrico debe considerarse como una fuente de torque, admitiendo sobrecargas del proceso y siendo capaz de producir una cantidad de torque concreta sin que la corriente supere su capacidad de sobrecarga térmica.

Considerando las nuevas condiciones para el proceso como mayor velocidad en el sistema de rodillos con una relación de transmisión fija en la caja reductora, se estimó la nueva potencia de carga requerida.

Por esta razón, para dimensionar el nuevo motor tomando en cuenta que el torque demandado por la carga es el mismo que el del sistema antiguo, se partió de una potencia de 91 Kw.

De acuerdo al rango de velocidad requerida del proceso y partiendo de la relación de acoplamiento de la caja reductora adquirida por Eternit S.A. se calcula la velocidad máxima para el motor mediante la ecuación siguiente:



$$\frac{\text{velocidad}_1 [\text{rpm}]}{\text{velocidad}_2 [\text{rpm}]} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)$$

$$\text{velocidad}_1 [\text{rpm}] = 80 [\text{rpm}] \times \left( \frac{24.11}{1} \right)$$

$$\text{velocidad}_1 = 1928.80 \text{rpm}$$

El torque constante requerido es:

$$P_{out} [\text{W}] = T [\text{Nm}] \times \omega [\text{rad} / \text{seg}]$$

$$1 \text{rpm} = \frac{2 \times \pi}{60} \times \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$P_{salida} [\text{Kw}] = \frac{T [\text{Nm}] \times n [\text{rpm}]}{9550}$$

$$T_{no \text{ min } al} [\text{Nm}] = \frac{9550 \times P_{salida} [\text{Kw}]}{n [\text{rpm}]}$$

$$T_{no \text{ min } al} [\text{Nm}] = \frac{9550 \times 91 \text{kW}}{1930 \text{rpm}}$$

$$T_{no \text{ min } al} = 450.28 \text{Nm}$$

Para un motor ABB de 4 polos la capacidad de carga térmica a bajas velocidades de acuerdo al catálogo técnico es del 80%, por lo que el torque nominal mínimo estimado es:

$$T_{no \text{ min } al} [\text{Nm}] \geq \frac{T_{no \text{ min } al}}{0.8}$$

$$T_{no \text{ min } al} [\text{Nm}] \geq \frac{450.25 \text{Nm}}{0.8}$$

$$T_{no \text{ min } al} \geq 562.85 \text{Nm}$$

La potencia nominal mínima del motor es:

$$P_{no\ min\ al}[Kw] \geq \frac{T[Nm] \times n[rpm]}{9550}$$

$$P_{no\ min\ al}[Kw] \geq \frac{562.85Nm \times 1800rpm}{9550}$$

$$P_{no\ min\ al} \geq 106.08Kw$$

El motor adecuado tomando en cuenta el derrateo por altura y temperatura es un motor de 125 Kw, 440 V, 199 A, 60 Hz, 1786 rpm, 0.87 de factor de potencia. Los datos técnicos y curvas del motor se especifican en el anexo B-1. El torque nominal del motor es:

$$T_{no\ min\ al}[Nm] = \frac{9550 \times P_{no\ min\ al}[Kw]}{n[rpm]}$$

$$T_{no\ min\ al}[Nm] = \frac{9550 \times 125Kw}{1786rpm}$$

$$T_{no\ min\ al}[Nm] = 668.39Nm$$

Una de las ecuaciones básicas de un motor de inducción es la relación entre el momento de inercia ( $J$  [ $kgm^2$ ]), la velocidad angular ( $\omega$  [rad/seg]) y el torque ( $T$  [Nm]). La ecuación es la siguiente:

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} = T - T_c \arg a$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_c \arg a$$

$$T = T_{din} + T_c \arg a$$

$$T_{din}[Nm] = J \times \frac{2 \times \pi}{60} \times \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Si el momento de inercia es de 2.3  $kgm^2$  dado como dato de catálogo del motor escogido y con un tiempo de aceleración de 10 segundos desde velocidad cero, el torque dinámico en aceleración es:

$$T_{din}[Nm] = 2.3kgm^2 \times \frac{2 \times \pi}{60} \times \frac{1930rpm}{10seg}$$

$$T_{din} = 46.48Nm$$

$$T[Nm] = T_{din}[Nm] + T_{c \arg a}[Nm]$$

$$T[Nm] = 46.48Nm + 562.85Nm$$

$$T = 609.33Nm$$

El torque total durante la aceleración es de 609.33 Nm, que es inferior al torque nominal del motor, por lo tanto no representa ningún problema para este motor.

El sistema de enfriamiento del motor escogido es por autoventilación, el cual a medida que se va reduciendo la velocidad del motor su capacidad térmica también disminuye. Este factor debe considerarse para el dimensionamiento del variador de velocidad ya que este define la capacidad de carga máxima a largo plazo del motor.

El acoplamiento mecánico con la caja reductora es a través de poleas conectadas por una banda que genera tensión al eje del motor, por lo que se requiriere modificar el rodamiento estándar tipo bola por uno tipo cilindro o de barril, el cual evita que se produzcan daños mecánicos que reducen la vida útil del motor.

#### *Dimensionamiento del variador de velocidad*

La corriente de un motor de inducción posee dos componentes: corriente reactiva ( $i_{sd}$ ) y corriente activa ( $i_{sq}$ ). El componente de corriente reactiva incluye la corriente de magnetización ( $i_{magn}$ ) mientras que la corriente activa es la que produce la potencia al eje expresada como torque por velocidad. Los componentes corriente reactiva y activa son perpendiculares entre sí.

La corriente de magnetización ( $i_{magn}$ ) no varía sustancialmente en el rango de flujo constante (por debajo del punto de debilitamiento de campo). En el rango de debilitamiento de campo, la disminución de la corriente de magnetización es

proporcional a la velocidad. Una estimación de la corriente de magnetización en el rango de flujo constante es la corriente reactiva ( $i_{sd}$ ) en el punto nominal del motor.

La corriente del motor se puede aproximar considerando el rango de flujo constante, Por debajo del punto de debilitamiento del campo, los componentes de la corriente pueden ser aproximadamente los siguientes:

$$I_{sd} = I_{no \text{ min al}} \left( \sin(\varphi_n) + \cos(\varphi_n) \left[ \sqrt{\left(\frac{T_{\text{max}}}{T_n}\right)^2 - 1} - \sqrt{\left(\frac{T_{\text{max}}}{T_n}\right)^2 - \left(\frac{T_c \arg a}{T_n}\right)^2} \right] \right)$$

$$I_{sq} = I_{no \text{ min al}} \left( \frac{T_c \arg a}{T_n} \right)^2$$

La corriente del motor total es:

$$i_m = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2}$$

Puede observarse que con el torque motor cero, el componente corriente activa es cero. Con unos valores de torque más elevados, la corriente de motor se vuelve bastante proporcional al par. Una buena aproximación a la corriente de motor total cuando  $0.8 \times T_n \leq T_{\text{carga}} \leq 0.7 \times T_{\text{max}}$  es:

$$0.8 \times 668 \text{ Nm} \leq 562.85 \text{ Nm} \leq 0.7 \times 1536.4 \text{ Nm}$$

$$534.40 \text{ Nm} \leq 562.85 \text{ Nm} \leq 1075.48 \text{ Nm}$$

$$I_{\text{motor}} [A] = \frac{T_c \arg a [\text{Nm}]}{T_{no \text{ min al}} [\text{Nm}]} \times I_{no \text{ min al}} [A]$$

$$I_{\text{motor}} [A] = \frac{562.85 \text{ Nm}}{668 \text{ Nm}} \times 199 \text{ A}$$

$$I_{\text{motor}} = 167.57 \text{ A}$$

Por encima del punto de debilitamiento del campo, los componentes de la corriente dependen asimismo de la velocidad.

$$I_{sd} = I_{nominal} \left( \frac{n_n}{n} \left( \sin(\varphi_n) + \cos(\varphi_n) \sqrt{\left( \frac{T_{max}}{T_n} \right)^2 - 1} \right) - \cos(\varphi_n) \sqrt{\left( \frac{T_{max}}{T_n} \times \frac{n_n}{n} \right)^2 - \left( \frac{T_{carga}}{T_n} \times \frac{n}{n_n} \right)^2} \right)$$

$$I_{sq} = I_{nominal} \left( \frac{T_{carga}}{T_n} \times \frac{n}{n_n} \right) \cos(\varphi_n) = I_{nominal} \left( \frac{P_{carga}}{P_n} \right) \cos(\varphi_n)$$

La corriente de motor puede aproximarse con bastante exactitud dentro de determinada zona operativa. La corriente de motor se vuelve proporcional a la potencia relativa. Una fórmula de aproximación para la corriente cuando

$$0.8 \times \frac{n_n}{n} \times T_n \leq T_{carga} \leq 0.7 \times \left( \frac{n_n}{n} \right)^2 \times T_{max} \text{ es:}$$

$$0.8 \times \frac{1786rpm}{1930rpm} \times 668Nm \leq 562.85Nm \leq 0.7 \times \left( \frac{1786rpm}{1930rpm} \right)^2 \times 1536.4Nm$$

$$494.52Nm \leq 562.85Nm \leq 905.56Nm$$

$$I_{motor}[A] = \frac{T_{carga}[Nm]}{T_{nominal}[Nm]} \times \frac{n}{n_n} \times I_{nominal}[A]$$

$$I_{motor}[A] = \frac{562.85Nm}{668Nm} \times \frac{1930rpm}{1786rpm} \times 199A$$

$$I_{motor} = 181.08A$$

Para la selección el variador de velocidad adecuado, se considera la corriente nominal del motor por encima del punto de debilitamiento de campo ya que se trabaja sobre la velocidad nominal del motor, la tensión de alimentación disponible ya que sus posibles variaciones afectarán a la potencia en el eje del motor reduciendo el torque en el rango de debilitamiento de campo y el torque máximo necesario.

ABB dispone de ciertas tablas de selección donde se facilitan los datos necesarios de corriente, tensión y potencia correspondiente a cada tamaño de convertidor.

ESPECIFICACIONES ACS800-02										
Especificaciones nominales		Uso sin sobrecarga	Uso en ligera sobrecarga	Uso en trabajo pesado		Disipación térmica	Flujo de aire			Tam. Bast.
<b>Un = 500 V (Rangos de 380 – 500V). Las especificaciones de potencia son válidas a tensión nominal (500 V).</b>										
I cont. máx.	I máx.	Potencia cont. máx.	In A	Pn Kw.	In A	Pn Kw.	dBA	m <sup>3</sup> /h	Código de tipo	
245	384	160	240	160	192	132	71	540	ACS800-02-0210-5	R7

Como estándar ABB tiene reactancias de entrada para la mitigación de armónicos hacia la red, ya que evitan la interferencia y el calentamiento de los cables de alimentación y protegen al convertidor contra oscilaciones de tensión en el lado de la red.

Como la distancia entre el variador de velocidad y el motor es de aproximadamente 15 metros encontrándose dentro del rango permitido por el fabricante, no se requiere colocar filtros senoidales para evitar reflexiones de voltaje.

#### *Dimensionamiento cables de fuerza*

De acuerdo a las especificaciones del fabricante tanto los cables de fuerza de alimentación al variador de velocidad como los que se dirigen desde este hacia el motor deben ser los mismos.

Para el cálculo del calibre del conductor cuando se trabaja con un variador de velocidad se considera la corriente alterna máxima que entrega en forma continua con un factor de seguridad del 15%.

$$I_{cont.max} = 245A$$

$$I = 1.15 \times I_{cont.max} = 281.75A$$

Conductor por fase # 3/0 AWG THW (310 A). Conductor en aire en temperatura ambiente de 30° C.



Dependiendo de la distancia del conductor se debe tomar en cuenta la caída de voltaje por la resistencia (R) propia del mismo, aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \frac{K_1 * L * I}{s} * K_2, \text{ debido a que el conductor es de cobre, } K_1=78.74 \text{ y } K_2=0.86$$

(sistema trifásico de tres hilos).

$$\Delta V = \frac{K_1 * L * I}{s} * K_2$$

$$\Delta V = \frac{78.74 * 15m * 281.75A}{167800CM} * 0.86$$

$$\Delta V = 1.70V$$

$$\Delta V\% = \frac{1.70V}{440V} * 100\%$$

$$\Delta V = 0.38\%$$

Considerando la resistencia y la reactancia (R + XL) del conductor, la caída de voltaje

$$\text{total es: } e = \sqrt{(RI)^2 + (XI)^2} [V]$$

Donde: RI = caída de voltaje por resistencia

XI = caída de voltaje por reactancia inductiva

Este cálculo se lo realiza por simples reglas de tres con los datos de resistencia y reactancia dados por tablas, dependiendo del conductor para una distancia de 1000 pies (1m = 3.28 pies).

$$R = 0.73 \frac{49.2 \text{ pies}}{1000 \text{ pies}} = 0.035\Omega$$

$$X_L = 0.044 \frac{49.2 \text{ pies}}{1000 \text{ pies}} = 0.00216\Omega$$

$$\Delta V = \sqrt{[(0.035)281.75]^2 + [(0.00216)281.75]^2}$$

$$\Delta V = 9.87V$$

$$\Delta V\% = \frac{9.87V}{440V} \times 100\%$$

$$\Delta V = 2.24\%$$

La caída de voltaje se encuentra bajo el máximo permitido, por lo tanto el calibre del cable escogido es el adecuado.

### *Protecciones*

Una de las opciones para la protección del variador de velocidad es el uso del seccionador fusible en conjunto con un contactor principal, de modo que cumplan con los requerimientos de protección dados por el fabricante.

La corriente de protección de cortocircuito es:

$$I_{protección} = 2.5 \times I_{cont. max} = 2.5 \times 245A = 612.5 A$$

<b>FUSIBLE (POR FASE)</b>					
<b>Corriente (A)</b>	<b><math>I^2t</math> (A<sup>2</sup>s)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Tipo DIN 43620</b>	<b>Tamaño</b>
500	145000	690	Bussmann	170M5810	DIN 2

La corriente máxima disponible del variador de velocidad:

$$I_{max} = 384A$$

<b>CONTACTOR</b>			
<b>Corriente (A) AC1</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Tipo</b>
400	690	ABB	A260-30-11-88

Una alternativa al conjunto anterior es utilizar un dispositivo con alto poder de corte equipado con un relé de mínima tensión, que funcione de tal manera que al

presentarse una suspensión en el voltaje de alimentación al convertidor lo seccione evitando una potencial existencia de sobrevoltaje a los terminales de entrada del equipo y el posible daño de los varistores de entrada.

La corriente de protección de sobrecarga es:

$$I = 1.25 I_{cont. max} = 1.25 \times 245 = 306.25 A$$

El fabricante especifica utilizar el siguiente interruptor, el cual posee protección contra sobre carga, cortocircuito selectivo o corto circuito instantáneo:

<b>BREAKER</b>					
<b>Corriente (A)</b>	<b>Poder de corte (kA)</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Tipo de relé</b>	<b>Tiempo de apertura (ms)</b>
320	85	500	ABB	Electrónico PR221DS	5

Modelo: T4L -320 PR221DS –LS/I In = 320 A, 3 polos FF

Eternit S.A. tomó la alternativa del interruptor automático como protección del circuito de fuerza, que cumple a cabalidad con los requerimientos del fabricante.

#### *Especificaciones para el armario*

Como el convertidor va a ser instalado en un armario cerrado, es necesario que se respeten ciertas distancias mínimas entre el equipo y el armario para que las condiciones de refrigeración sean las mejores.

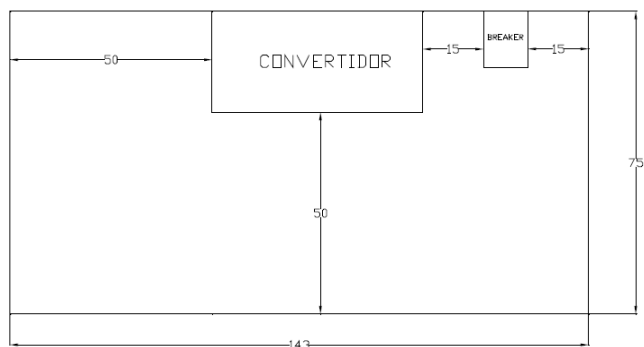


Figura 3. 1 Vista superior del armario (dimensiones en cm.)

Dentro del armario el variador de velocidad requiere una cantidad de aire de refrigeración puro especificada de  $540 \text{ m}^3/\text{h}$ , el mismo que entrará en la unidad a través de dos ventiladores colocados en la parte izquierda inferior y circulará hacia arriba hacia dos extractores que se encuentran en el techo del tablero, de modo que no exista recirculación de aire en el interior de la unidad.

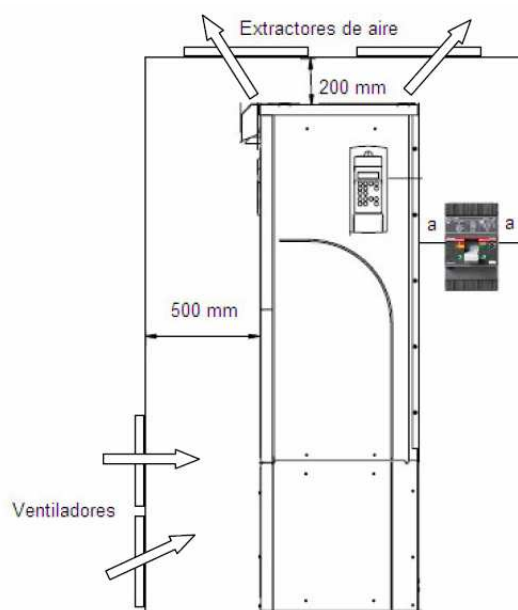


Figura 3. 2 Flujo del aire de refrigeración

### 3.3 LOGICA DE CONTROL

#### *Control de arranque del motor*

El variador de velocidad posee parámetros programables divididos en grupos, el grupo 10 de programación MARCHA/PARO/DIRECCIÓN se encarga del control del motor al momento del arranque.

El parámetro 10.1 define las conexiones y el origen de los comandos de marcha, paro y dirección desde un control externo, se lo programó definiendo que el control se lo realiza desde un pulsante de marcha normalmente abierto conectado a la entrada digital uno (ED1) de la tarjeta RMIO de control del convertidor y un pulsante de paro normalmente cerrado conectado a la entrada digital dos (ED2).



Figura 3. 3 Pulsantes de marcha/paro/emergencia

Una de las condiciones de operación del proceso es la dirección del giro del motor. Esta es única y se fija según el parámetro 10.3. La programación es forzada para que el motor solo pueda girar en avance (sentido antihorario), y de esta manera no se cometan errores si se quiere cambiar el giro del motor a través de las teclas de función de giro del panel del variador de velocidad.

El grupo de parámetros 16 define el permiso de marcha del motor. El hongo de parada de emergencia está conectado en la entrada digital tres (ED3), en posición normalmente cerrado, de modo que, en el caso de surgir una emergencia se presiona el hongo, la entrada digital se abre y se bloquea la energía del convertidor hacia el motor.

El arranque es controlado con rampas de aceleración, con un tiempo de arranque programado para que el motor pueda arrancar pero que a su vez no llegue a un calentamiento peligroso y que la corriente de arranque no tenga picos tan elevados como un arranque directo.

#### *Control de velocidad*

La velocidad es controlada a través de un potenciómetro de precisión como referencia externa al convertidor conectado a la entrada analógica de voltaje diferencial (EA1) de la tarjeta de control RMIO, cuyos valores límites van desde 0 V a 10 V.

De acuerdo con la tecnología de control utilizada, en este caso control DTC, la referencia externa de velocidad es traducida a revoluciones por minuto programándola de modo que varíe en un rango de 200 rpm a 1930 rpm.



Figura 3. 4 Potenciómetro de precisión

El variador de velocidad no requiere de un dispositivo de realimentación de velocidad, debido a que realiza una simulación matemática interna para determinar la posición y velocidad actual en cada instante del motor, siendo esta la base de la filosofía de trabajo del Control de Torque Directo<sup>1</sup>.

Para el trabajo en la laminadora de planchas, el operador requiere visualizar la velocidad del rodillo en revoluciones por minuto, es decir, la velocidad del proceso a la salida de la caja reductora. Tomando en consideración la relación de acoplamiento, el indicador digital Commander C150 ABB colocado en el panel de control, es programado para mostrar la velocidad reducida.



Figura 3. 5 Indicador digital Commander C150 ABB

---

<sup>1</sup> Este tipo de variador de velocidad posee una gran cantidad de posibilidades de control del motor que no son usadas en este proyecto. El modo de control DTC se detalla en el capítulo 6

Dicho indicador recibe una señal de corriente de 4 – 20 mA, desde la salida análoga uno (SA1) de la tarjeta de control del variador de velocidad, la misma que ha sido programada en el grupo de parámetros 15 para indicar el rango de velocidad del motor.

### *Alarmas, fallos y protecciones*

De acuerdo a la programación dada en los grupos de parámetros 20 LIMITES y 30 FALLOS, el variador de velocidad puede proteger al motor y a si mismo de posibles daños en el momento del arranque como en régimen permanente.

Un mensaje de alarma o fallo en la pantalla del panel indica un estado anormal del convertidor. La mayoría de causas de alarmas y fallos pueden identificarse y corregirse con esta información.

La programación correcta de los límites de trabajo del motor de inducción, como velocidad, corriente y torque permiten al variador de velocidad detectar fallas en el proceso como sobrecarga, bloqueo del rotor, sobretemperaturas, falta de fase, fallo a tierra, etc.



# CAPÍTULO 4

## **DISEÑO DE LA INTERFAZ HOMBRE - MAQUINA**

Actualmente en la gran mayoría de los procesos industriales existe la tendencia de que sean monitoreados y en determinados casos controlados desde un computador. Para lograr este propósito es necesario que los equipos involucrados en el proceso tengan la capacidad de comunicarse con un computador a través de un protocolo o bus de campo.

Para el efecto existe software que permite procesar la información del proceso productivo y presentarla en forma amigable en la pantalla, creando un sistema llamado interfaz hombre – máquina (HMI).

Para el presente caso se usa el software, “WonderWare InTouch” en su versión de demostración para efectos del proyecto de titulación.

### **4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE INTOUCH**

InTouch es un paquete computacional que se caracteriza por trabajar en un ambiente gráfico y diseñado para trabajar con procesos industriales. La interfaz gráfica permite un manejo bastante sencillo a los administradores u operadores del proceso, siempre y cuando las aplicaciones desarrolladas sean intuitivas.

Como se mencionó anteriormente, el programa Intouch es capaz de trabajar en ambientes industriales en los que se requiere monitorear varios equipos involucrados y que son capaces de enviar y recibir información a través de algún protocolo de comunicación industrial; para ello, Intouch, utiliza un I/O Server, el cual tiene como tarea principal la comunicación entre los principales equipos involucrados en el proceso y el computador.

Intouch está formado fundamentalmente por tres programas, los cuales son los siguientes:

#### *Intouch Application Manager*

Se utiliza para organizar aplicaciones creadas bajo Window Maker y para configurar Window Viewer como un servidor NT.

#### *Window Maker*

Es el llamado ambiente de desarrollo donde objetos orientados y gráficos son utilizados para crear ventanas animadas generalmente con ambientes industriales.

#### *Window Viewer*

Es el programa usado para mostrar las ventanas animadas creadas en Window Maker en tiempo real. Además posee un programa de diagnóstico Wonderware Logger.

### **4.1.2 REQUERIMIENTOS MINIMOS DE SISTEMA**

Para ejecutar adecuadamente el programa Intouch son recomendadas las siguientes especificaciones de sistema:

- Procesador tipo Pentium 100 o superior.
- 100 MB mínimo libres en el disco duro.
- Monitor SVGA
- Artículo de punteo (mouse, touch screen, etc)

- Sistema operativo: Microsoft Windows 95 (o superior) o Windows NT 4.0 SP4 (o superior).

## 4.2 LÓGICA DE MONITOREO

En este programa, se han desarrollado varias pantallas que muestran información del funcionamiento del proceso, estado del convertidor de frecuencia y datos estadísticos del comportamiento de las variables.

La figura 4.1 muestra la lógica de operación del interfaz hombre-máquina (HMI) del proceso.

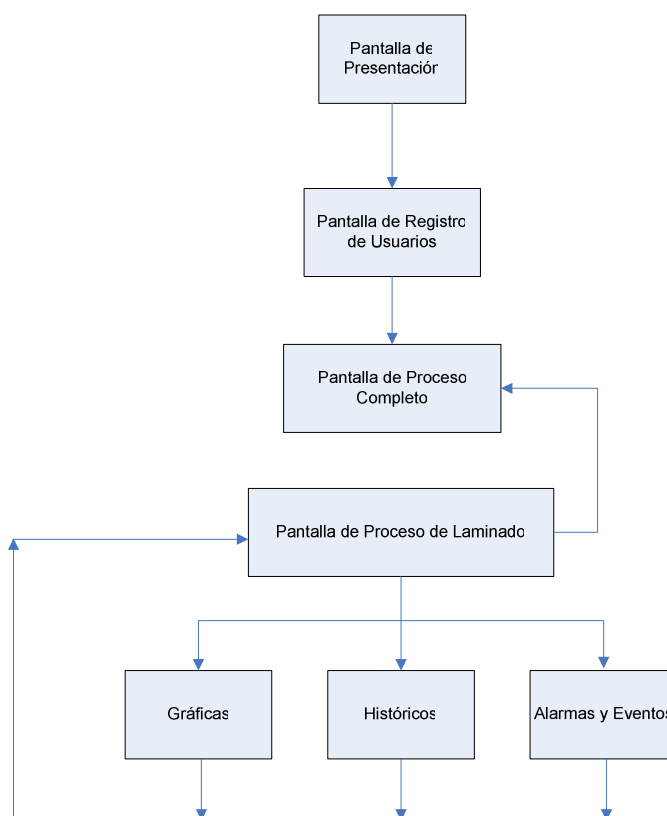


Figura 4. 1 Diagrama de funcionamiento de la HMI

## 4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS VENTANAS DE LA HMI

### 4.3.1 PRESENTACIÓN

El programa inicia con una pantalla llamada “PRESENTACIÓN” (figura 4.2), en la cual se detalla información sobre el proyecto de titulación.

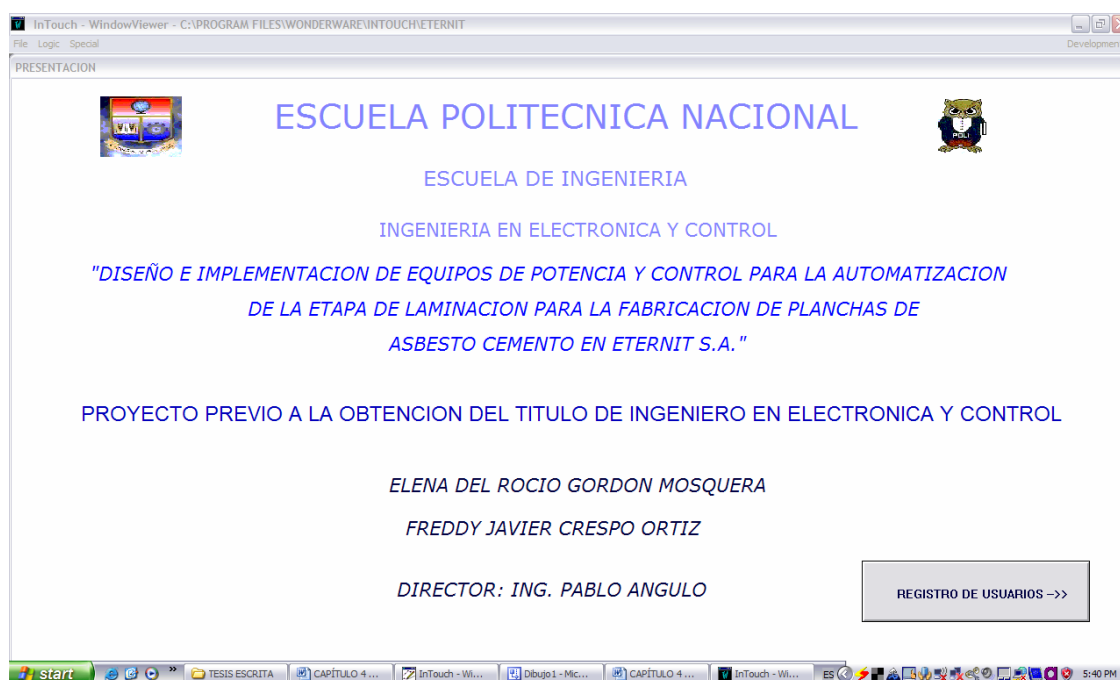


Figura 4. 2 Pantalla “PRESENTACION”

Como se muestra en la lógica de operación, la pantalla inicial de presentación, contiene un botón con el texto: “REGISTRO DE USUARIOS”, el cual sirve para avanzar en la aplicación hacia la siguiente pantalla.

### 4.3.2 REGISTRO DE USUARIOS

Luego de pulsar el botón “REGISTRO DE USUARIOS” de la pantalla de presentación, se muestra la pantalla con el mismo nombre, en la cual se introduce un nombre de usuario y su respectiva contraseña, cada usuario tendrá diferente nivel de acceso hacia la aplicación.

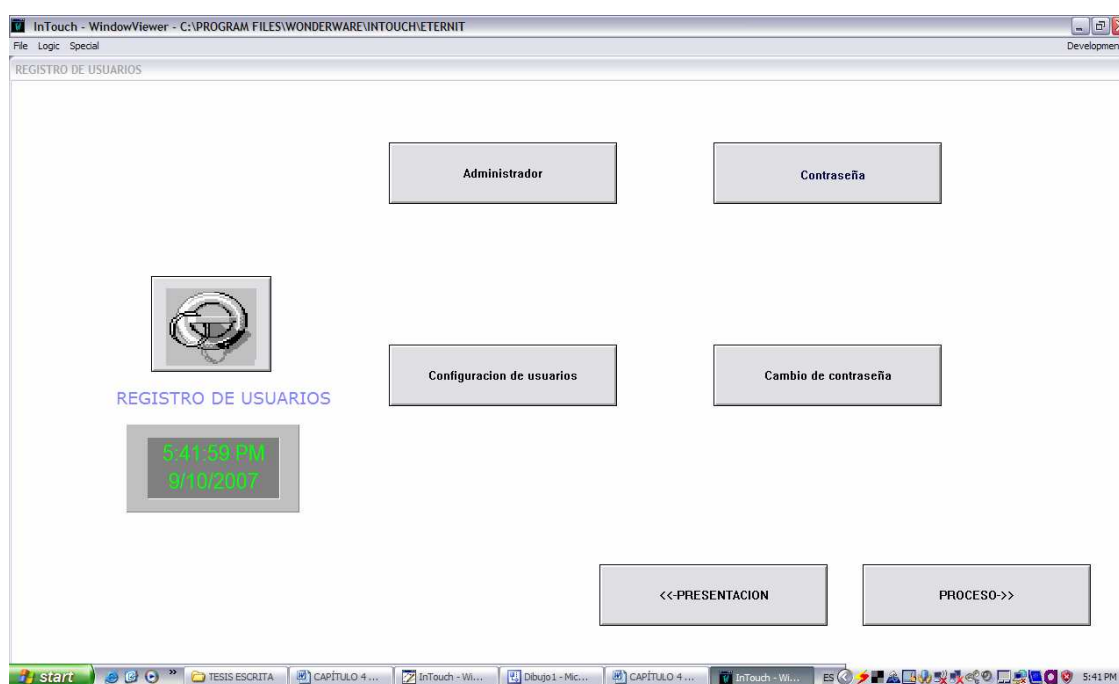


Figura 4. 3 Ventana “REGISTRO DE USUARIOS”

Al presionar el botón “Usuario”, se debe ingresar el nombre de usuario, el cual, luego, al introducir la contraseña correcta definirá el nivel de acceso hacia la aplicación.

Luego de introducir el nombre de usuario, en necesario presionar el botón “Contraseña”, en el cual se ingresa la contraseña para poder acceder a las siguientes pantallas de la aplicación.

La función del botón “Configuración de usuarios” es modificar los siguientes datos: nombre, contraseña y nivel de acceso de cada usuario; para poder acceder a esta configuración, el usuario deberá tener un nivel de acceso mayor a 8001. La pantalla de configuración es la siguiente y se deberá llenar la información indicada.

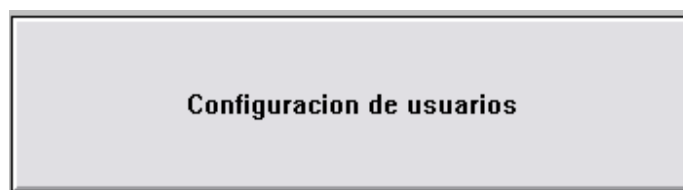


Figura 4. 4 Botón “CONFIGURAR USUARIOS”

User Name: Se define el nombre de usuario.  
 Password: Se define la contraseña para cada usuario.  
 Access Level: El nivel de acceso se define para dar a cada usuario acceso o restricción para ingresar al sistema o ver información del mismo. El máximo nivel de acceso es 9999.

En la siguiente tabla (Tabla 4.1) se indica cada usuario con su respectiva contraseña y nivel de acceso asignado.

User Name	Password	Access Level	Descripción
Administrador	adm	9999	Acceso a todas las pantallas de la aplicación, con la capacidad de realizar modificaciones.
Operador	operador	8000	Acceso limitado a ciertas ventanas del proceso.
Invitado	invitado	5000	Acceso solamente a la ventana de proceso.

Tabla 4. 1 Nombres, contraseña y nivel de acceso de los usuarios

Es decir que el único usuario al que se le está permitido configurar usuarios es el administrador del sistema.

Con el botón “Cambio de contraseña”, se activa la ventana mostrada en la figura 4.5, en la cual se puede modificar la contraseña del usuario que está operando la aplicación en ese preciso instante. Para cambiar la contraseña de un usuario, es requisito escribir la contraseña actual y posteriormente la nueva contraseña, la cual se debe verificar volviendo a escribirla.

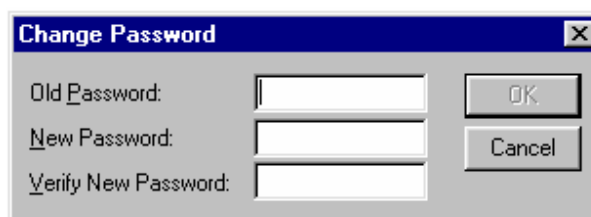


Figura 4. 5 Botón “CAMBIAR CONTRASEÑA”

### 4.3.3 PROCESO

La ventana de proceso es la que mayor relevancia tiene en la aplicación, puesto que al tratarse de una interfaz gráfica, es en esta ventana donde el usuario podrá monitorear al proceso.





#### 4.3.4 LAMINADO

En esta ventana, se puede monitorear las variables de los equipos involucrados en la formación de láminas; desde que el material es solo una pasta hasta que ésta se compacta para formar placas planas. Además se indica el estado del rodillo, es decir si este se encuentra girando o está detenido.

El acceso al resto de la información (gráficas, históricos, alarmas) se los hace desde esta ventana, dependiendo del nivel de acceso del usuario.

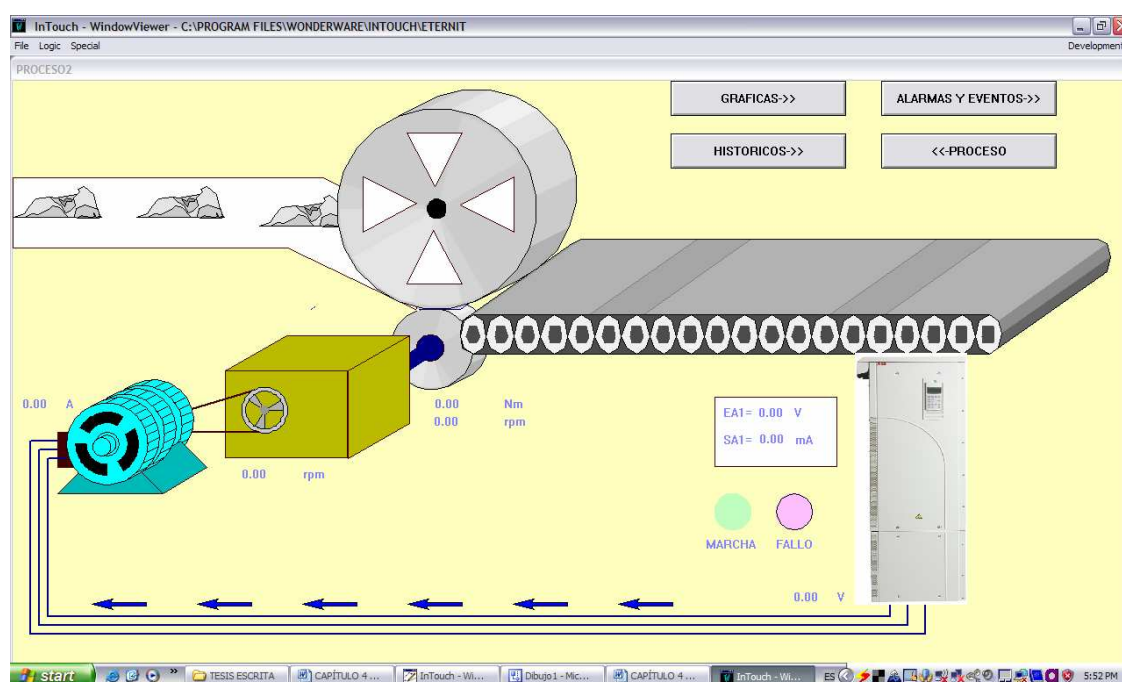


Figura 4. 7 Ventana de “LAMINADO”

#### Gráficas

En esta ventana se puede visualizar el valor de las variables monitoreadas y como estas cambian en el tiempo.

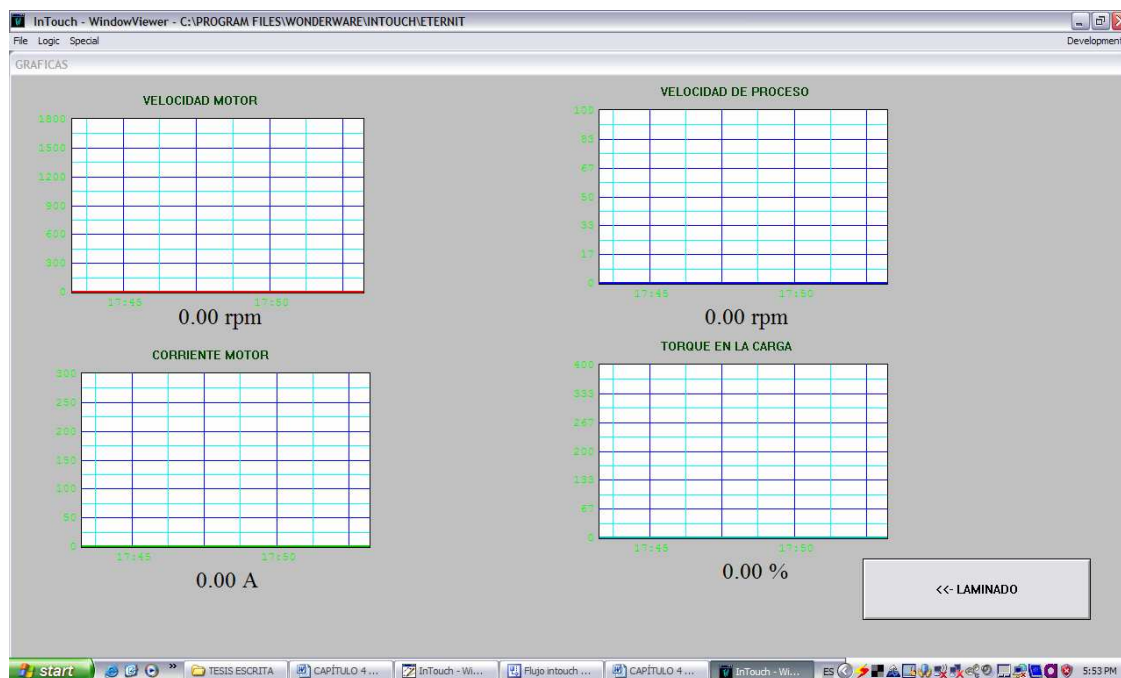


Figura 4. 8 Ventana “GRAFICAS DE PROCESO”

### *Históricos*

El histórico refleja acontecimientos pasados, la ventana (figura 4.9) muestra el funcionamiento del proceso en una fecha y hora indicadas.

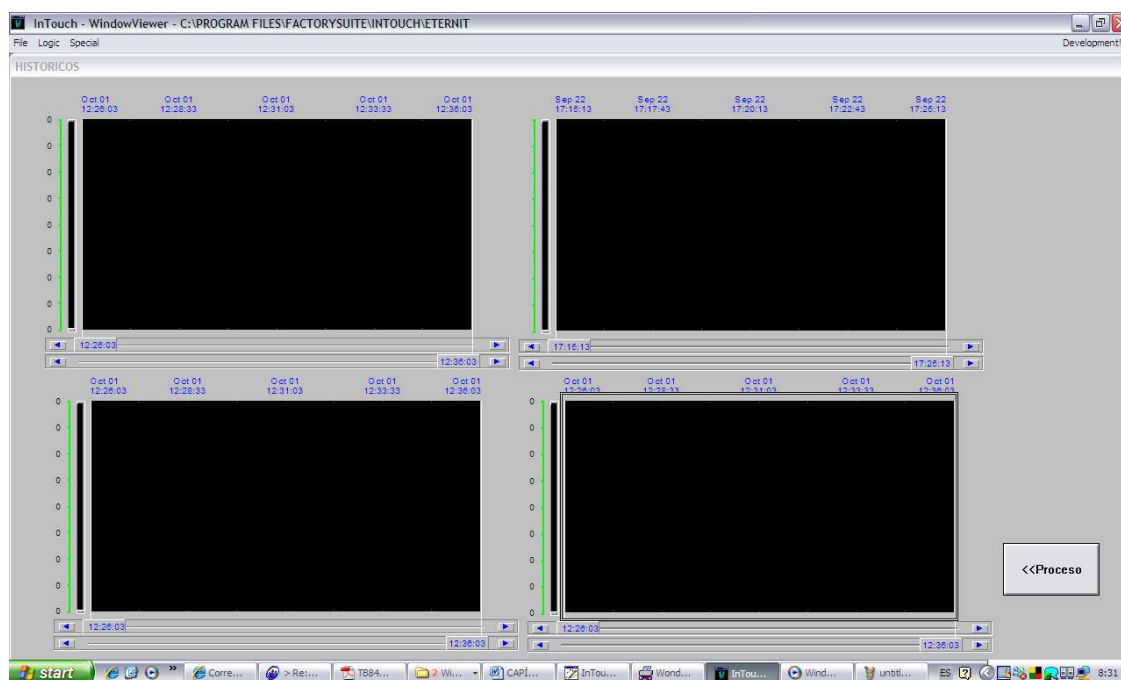


Figura 4. 9 Ventana “HISTORICOS DE PROCESO”

Al dar doble clic sobre el fondo del histórico se puede escoger la fecha y hora deseadas para conocer que sucedió en el proceso.

### *Alarmas y Eventos*

Las alarmas son condiciones de proceso, para indicar falla o tener precaución con cierta o ciertas variables. Los mensajes del evento alarmas son en forma de texto como se despliega en la figura 4.10.

Date	Time	State	Class	Type	Priority	Name	Group	Priority
09/10	17:39:50		EVENT	SYSTEM	899	\$Operator	\$System	InTou
09/10	17:38:50		EVENT	SYSTEM	899	\$HistoricalLogging	\$System	InTou
09/10	17:38:51		EVENT	SYSTEM	899	\$OperatorName	\$System	InTou
09/10	17:38:51		EVENT	SYSTEM	899	\$OperatorDomain	\$System	InTou
09/10	17:38:51		EVENT	SYSTEM	899	\$LogRunning	\$System	InTou
09/10	17:41:05		EVENT	OPR	899	\$OperatorEntered	\$System	InTou
09/10	17:41:08		EVENT	SYSTEM	899	\$AccessLevel	\$System	InTou
09/10	17:41:08		EVENT	SYSTEM	899	\$OperatorName	\$System	InTou
09/10	17:41:08		EVENT	SYSTEM	899	\$Operator	\$System	InTou

Figura 4. 10 Ventana “ALARMAS DE PROCESO”

#### 4.4 COMUNICACIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD CON INTOUCH

La comunicación entre el convertidor de frecuencia y el programa Intouch se la realiza por medio del protocolo de comunicación industrial Modbus RTU. Mediante el uso de un módulo de adaptación, los parámetros configurados y leídos desde el convertidor de frecuencia son transformados a datos en direcciones Modbus. Adicionalmente se necesita el uso de un programa específico para intercambio de datos en el computador, conocido como I/O Server. Para este caso, se utiliza el I/O Server Modicon MODBUS.

Un I/O Server, es un programa que trabaja bajo ambiente Windows y utiliza el protocolo DDE (Dynamic Data Exchange) para la comunicación interna con el Intouch.

Debido a que se está usando el protocolo Modbus, los datos son enviados desde el módulo adaptador de datos conectado al convertidor de frecuencia mediante un enlace RS485 de 2 hilos; para que dichos datos puedan ser leídos por el puerto serial del computador, es necesario el uso de un convertidor RS232/485.

Los parámetros del convertidor de frecuencia y los datos de información están direccionados dentro de un área de registros, la cual puede ser leída desde un dispositivo externo o puede ser modificada escribiendo en los valores de los registros. No hay parámetros de configuración para el direccionamiento de los registros; éste está predefinido y corresponde directamente al grupo de parámetros del variador, los cuales están siendo usados por el panel local. Así, a cada parámetro le corresponde una dirección 4xyyy, donde:

xx corresponde al grupo de parámetros,

yy corresponde al número del parámetro dentro del grupo.

- Las direcciones 40001 a 40096 están reservadas para configuraciones de datos.
- Las direcciones 40101 a 49999 están reservadas a los parámetros del convertidor de frecuencia.

#### **4.4.1 PROTOCOLO MODBUS**

El protocolo Modbus, es un estándar interno desarrollado por Modicon en 1979 para el intercambio de mensajes entre controladores. Con este protocolo, los controladores Modicon pueden comunicarse entre sí y con otros dispositivos sobre una variedad de redes industriales. Los dispositivos dentro de una red Modbus, utilizan la arquitectura Maestro/Esclavo; en la cual solo puede existir un maestro quien es el que inicia la comunicación solicitando un dato a un esclavo o enviando una orden para que sea ejecutada por el esclavo. A esta manera de comunicación se la denomina Pregunta – Respuesta.

La Pregunta, hace referencia a un mensaje enviado desde el maestro hacia un esclavo o inclusive hacia todos los esclavos. Cada petición del maestro debe llevar un código de función que determinará la acción que debe realizar el esclavo diseccionado por el maestro. Adicionalmente, los bits de datos, proveerán información para que el esclavo pueda cumplir su función asignada. Finalmente, un campo de chequeo de errores, permite verificar la integridad de los datos recibidos por el esclavo.

Si el esclavo envía una respuesta correcta, el código de función debe ser un eco de enviado por el maestro en la pregunta. Los bits de datos contienen la información recolectada por el esclavo en forma de registros o estados. Si algún error llega a ocurrir, el código de función cambiará indicando que existió un error. De la misma manera que a los esclavos, el campo de chequeo de errores le permite al maestro verificar la integridad de los datos transmitidos.

El maestro puede direccionar a un solo esclavo, en cuyo caso éste devolverá una respuesta al maestro, o puede direccionar a todos a la vez, enviando un mensaje broadcast, asignando a la dirección de esclavo el valor 0, pero ningún esclavo responderá al maestro.

Las tramas MODBUS transmitidas por el maestro contienen la siguiente información:

- La dirección MODBUS del esclavo interrogado (1 byte)
- El código de función que define la solicitud del maestro (1 byte)
- Los datos que se intercambiarán (N bytes)
- El código de control CRC16 (2 bytes)

La trama tiene una longitud máxima total de 240 bytes, lo que permite el intercambio de un máximo de 100 datos de palabra o 255 datos binarios.

Los equipos dentro de una red Modbus, se pueden configurar escogiendo uno de los dos modos de transmisión: ASCII o RTU, además de los parámetros de

comunicación serial: velocidad de transmisión, número de bits de parada, tipo de paridad, etc. Para este caso en particular, se utilizará el modo de transmisión RTU.

### *MODO ASCII*

Cuando se configura el modo ASCII (Código Estándar Americano para el Intercambio de Información), cada byte de 8 bits se envía como dos caracteres ASCII.

El sistema de codificación será el siguiente:

- Hexadecimal, caracteres ASCII 0...9, A...F
- Un carácter hexadecimal es contenido en cada carácter ASCII del mensaje enviado.

Los datos enviados tendrán la siguiente disposición de bits:

- 1 bit de inicio
- 7 bits de datos, el bit más significativo se envía primero
- 1 bit de paridad (par o impar), ningún bit para no paridad
- 1 bit si se usa paridad, 2 bits si no se usa paridad

El campo de chequeo de errores usado es LRC (Control de Redundancia Longitudinal)

### *MODO RTU*

Cuando los equipos se configuran bajo el modo RTU (Remote Terminal Unit), cada byte de 8 bits en un mensaje, contiene dos caracteres hexadecimales de cuatro bits. La ventaja principal de usar este modo es que su gran densidad de caracteres permite mejor rendimiento, cada mensaje se envía en forma continua.

El sistema de codificación será el siguiente:



- Binario de 8 bits, hexadecimal 0...9, A...F
- Cada campo de 8 bits contiene dos caracteres hexadecimales

Los datos enviados tendrán la siguiente disposición de bits:

- 1 bit de inicio
- 8 bits de datos, el bit menos significativo se envía primero
- 1 bit de paridad (par o impar), ningún bit para no paridad
- 1 bit si se usa paridad, 2 bits si no se usa paridad

El campo de chequeo de errores usado es CRC (Control de Redundancia Cíclica)

En la trama RTU, los mensajes comienzan con un intervalo silencioso de al menos 3,5 tiempos de carácter. El primer campo transmitido es la dirección del destinatario del mensaje, así cuando este campo es recibido, cada dispositivo lo decodifica para saber si es el dispositivo seleccionado.

Modbus basa su modelo de datos en una serie de tablas que poseen distintas características. Las cuatro tablas primarias son:

<b>Tablas primarias</b>	<b>Tipo de Objeto</b>	<b>Tipo</b>	<b>Código</b>
Entradas discretas	Bit	Lectura	02
Bobinas	Bit	Lectura/Escritura	01
Registros de entrada	16 bits word	Lectura	04
Registros de salida	16 bits word	Lectura/Escritura	03

Tabla 4. 2 Códigos de Función primarios de Modbus

#### 4.4.2 CONFIGURACIÓN DEL I/O SERVER

El paso inicial a seguir es instalar este software en el computador, para luego configurarlo para su correcto funcionamiento.

Los requisitos de instalación de este paquete son:

1. Microsoft Windows 95, Windows 98 o Windows NT 4.0
2. 1.5 MB de espacio en el disco duro.
3. Disponer de un puerto serial.

Una vez instalado el software, el siguiente paso es configurar el I/O Server, a continuación se describe la configuración del programa:



Figura 4. 11 Ventana del programa Modicon MODBUS

##### *Configuración del Puerto de Comunicaciones*

La figura 4.11 muestra la ventana inicial del I/O Server, cuando se encuentra fuera de línea.

Para configurar el puerto de comunicaciones, se debe acceder a la opción "Configure" de la barra de menú y a continuación se selecciona "Com Ports Settings".

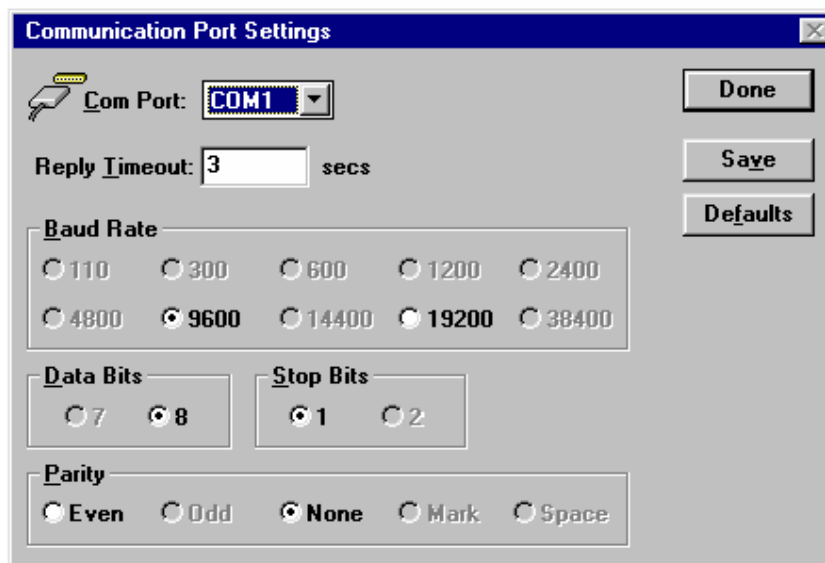


Figura 4. 12 Ventana de configuración del puerto de comunicaciones

En la ventana de configuración mostrada en la figura 4.12 se selecciona el puerto serial que se va a utilizar (COM1), tiempo de respuesta Reply Timeout, velocidad de transmisión de datos, número de bits por dato, bits de parada y tipo de paridad. Para que todos estos cambios se almacenen, se debe dar un clic en el botón "Save" y a continuación se acepta y cierra la ventana de configuración, dando un clic en Done.

#### *Configuración del Topic*

Intouch intercambiará información con el I/O Server usando comunicación DDE (Dynamic Data Exchange). Para lograr dicha comunicación, es necesario la creación de un "Topic", el mismo que va a ser configurado para ser usado en Intouch.

Para la configuración del Topic se accede a la opción "Configure" de la barra de menú, seguidamente se selecciona "Topic Definition" para acceder a la siguiente ventana como se muestra en la figura 4.13

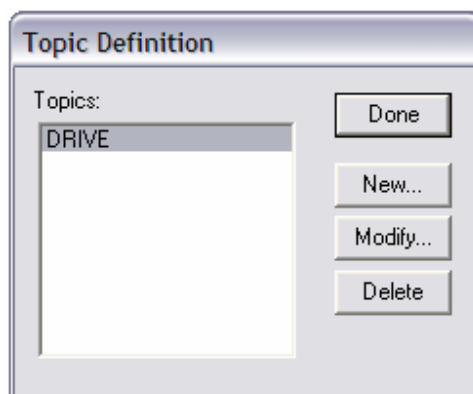


Figura 4. 13 Ventana de configuración del Topic

Este cuadro de diálogo puede ser utilizado para crear nuevos “Topics” así como para modificar o eliminar los existentes. Para crear un “Topic”, se accede a la opción “New”, luego de lo cual aparecerá la ventana mostrada en la figura 4.15; en la cual se deberá ingresar el nombre del Topic definido por el usuario. Esta información será necesaria también para configurar la adquisición de datos en Intouch. Otro punto de interés es “Com Port”, el cual debe coincidir con la configuración de la sección previa. Las opciones de configuración restantes, serían necesarias solamente para dispositivos particulares. Finalmente, se acepta dando un clic en “OK”, luego de lo cual se regresa a la ventana “Topic Definition”. Para guardar todas las configuraciones seleccionadas, es necesario dar un clic en el botón “Done”, luego de lo cual la configuración está completa.

La opción “Delete” se debe utilizar únicamente si se desea borrar un Topic, previa confirmación, como se muestra en la figura 4.14:

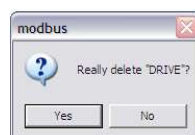


Figura 4. 14 Confirmación de eliminación de un Topic

Figura 4. 15 Ventana de definición del Topic

Topic Name	Nombre asignado al Topic
Slave ID	Dirección del esclavo
Com Port	Puerto de comunicación
Update Interval	Tiempo de actualización

#### *Configuración del Servidor de Datos*

Finalmente se debe configurar el DDE Server Settings tal y como se indica en la figura 4.16

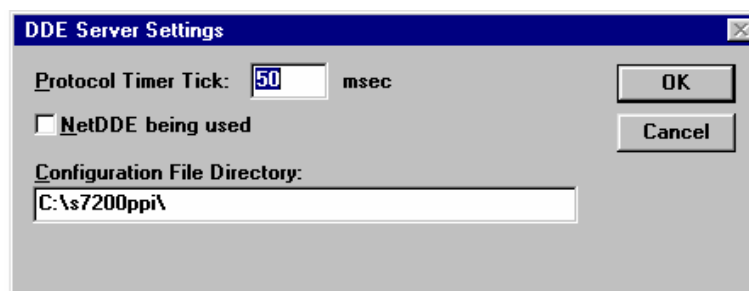


Figura 4. 16 Ventana de configuración del servidor de datos.

El principal elemento de interés aquí, es la última opción de selección “Start automatically as Windows NT Service”. Cuando se elige dicha opción, esto forzará al I/O Server Modbus a correr automáticamente cada vez que el computador es encendido.

El contador de tiempo de protocolo (Protocol Timer Tick) esta por defecto en 50 ms este tiempo puede ser menor o mayor haciendo que la comunicación sea muy rápida o muy lenta en el intercambio de datos. El casillero NetDDE es para activar la red de Wonderware automáticamente en este caso no se selecciona. En el casillero inferior se escribe la ruta donde está instalado el I/O Server.

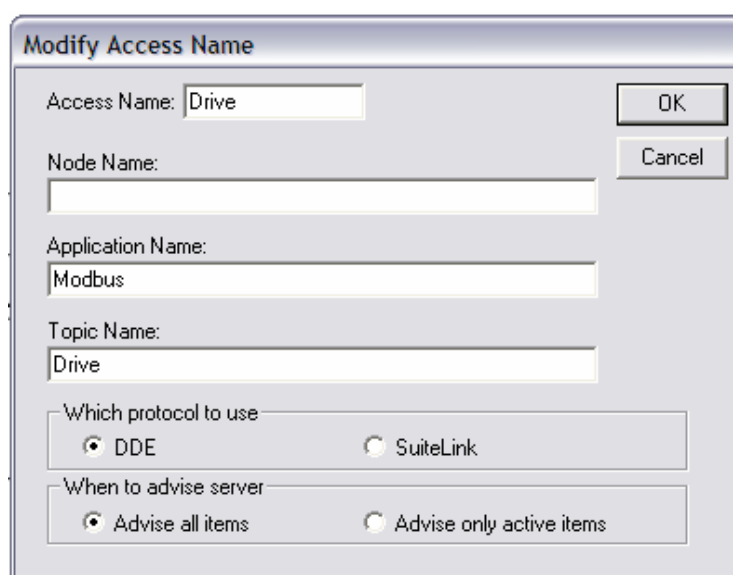
#### 4.4.3 CONFIGURACION DE ITEMS EN INTOUCH

Para que los datos provenientes desde el convertidor de frecuencia puedan ser leídos por Intouch, es necesario asignar un tagname a cada variable a ser monitoreada. Un tagname es la manera como reconoce Intouch a los datos con los que trabaja; los cuales deben ser, para este caso, de tipo I/O Real.

El siguiente paso en este proceso, es configurar WonderWare InTouch. Un “Access Point” y crear “Tag Names” para permitir la visualización gráfica en el programa y para que pueda realizarse la comunicación con el I/O Server Modbus. Un Access Name sirve para asociar a cada uno de los I/O tagnames de Intouch. Access Name

es aquel que contiene la información del nombre de la aplicación (Application Name), y el nombre del tópico (Topic Name).

En el cuadro de diálogo de la figura 4.17, se debe llenar toda la información requerida. El Access Name es arbitrario y para simplicidad debería coincidir con el Application Name. El Application Name debe ser "ModBus", ya que se está usando el I/O Server con dicho nombre. El Topic Name debe ser el mismo que se configuró en el I/O Server "Topic Definition". Se debe asegurar que la opción DDE esté activa para permitir una correcta comunicación.



The image shows a dialog box titled "Modify Access Name". It contains the following fields and options:

- Access Name: Drive
- Node Name: (empty)
- Application Name: Modbus
- Topic Name: Drive
- Which protocol to use:
  - DDE
  - SuiteLink
- When to advise server:
  - Advise all items
  - Advise only active items

Buttons: OK, Cancel

Figura 4. 17 Ventana de configuración del Access Name

La dirección de cada dato a ser leído, debe ser ingresada en el casillero Item, como se muestra en la figura 4.18.

The image shows a software dialog box titled "Tagname Dictionary". It has a tabbed interface with "Main", "Details", "Alarms", "Details & Alarms", and "Members". The "Details" tab is selected. At the top, there are buttons for "New", "Restore", "Delete", "Save", "Select...", and "Cancel/Close". The main area contains the following fields and options:

- Tagname: Frecuencia
- Type: I/O Real
- Group: \$System
- Read only:  Read only,  Read Write
- Comment: (empty text box)
- Log Data:  Log Data,  Log Events,  Retentive Value,  Retentive Parameters
- Initial Value: 0, Min EU: -32768, Max EU: 32767
- Deadband: 0, Min Raw: -32768, Max Raw: 32767
- Eng Units: (empty text box)
- Conversion:  Linear,  Square Root
- Access Name: ..., Drive
- Item: 40103
- Use Tagname as Item Name:  Use Tagname as Item Name, Log Deadband: 0

Figura 4. 18 Ventana del Tag Name "Frecuencia"

El Tag Name "Frecuencia", utilizado como ejemplo en la figura 4.18; es de tipo I/O Real.



# CAPÍTULO 5

## **MONTAJE, INSTALACIÓN Y PUESTA EN MARCHA**

Para el desarrollo del proyecto se partió del diseño de los equipos necesarios para el sistema, el diseño del tablero de fuerza y el tablero de operación.

En este capítulo se exponen las actividades realizadas durante la instalación y montaje de los equipos, instrucciones y recomendaciones de seguridad.

### **5.1. MONTAJE E INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS**

Una vez definidos y adquiridos los equipos que se requerían para el proyecto, se diseñó y construyó el armario para alojar el interruptor automático, el variador de velocidad y el circuito de fuerza para alimentación eléctrica, de acuerdo a lo especificado en el capítulo 3.

El armario se colocó en el local destinado a los tableros de distribución, se instaló la puesta a tierra y se montaron los siguientes equipos:



Figura 5. 1 Montaje de los equipos dentro del armario de fuerza

### *Variador de velocidad*

Debido a que este variador basa su lógica de control y operación en el modelo matemático interno del motor específico al que va conectado, se requiere que previo al arranque del sistema se realice una identificación del motor por parte del variador, denominada “Magnetización de ID”, en la que se magnetiza al motor con el rotor parado durante aproximadamente un minuto para después hacerlo girar en ambos sentidos; de esta manera se garantiza un control óptimo del motor. A pesar de que este procedimiento se lo puede hacer con el eje del motor acoplado a la carga, esta actividad se la realizó previamente a la instalación del motor y del variador de

velocidad en el sitio final de trabajo para evitar inconvenientes en la carga cuando el motor está girando en sentido inverso al deseado.

El primer paso para el montaje del variador de velocidad, es la identificación del tamaño del bastidor y sus dimensiones.

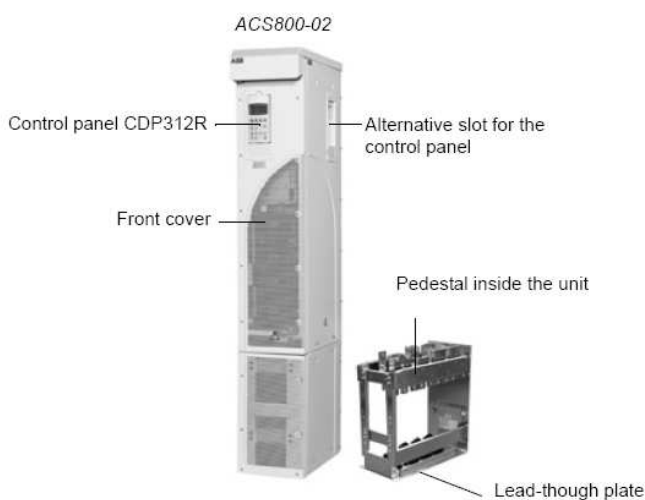


Figura 5. 2 Variador de velocidad ACS800-02-0210-5

### BASTIDOR R7

PESO DEL DRIVE: 110 Kg.

DIMENSIONES: 1507 x 250 x 524 mm (H x W x D)

Para la instalación y montaje del variador de velocidad, es necesario seguir las siguientes recomendaciones:

- El convertidor debe ser levantado sólo por la parte superior empleando los cáncamos fijados en la unidad; La parte inferior podría resultar deformada si el convertidor es inclinado; la unidad tiene un centro de gravedad alto y se volcaría si su inclinación supera los 6 grados aproximadamente (Figura 5.3). El pedestal del convertidor no debe ser retirado antes del levantamiento.

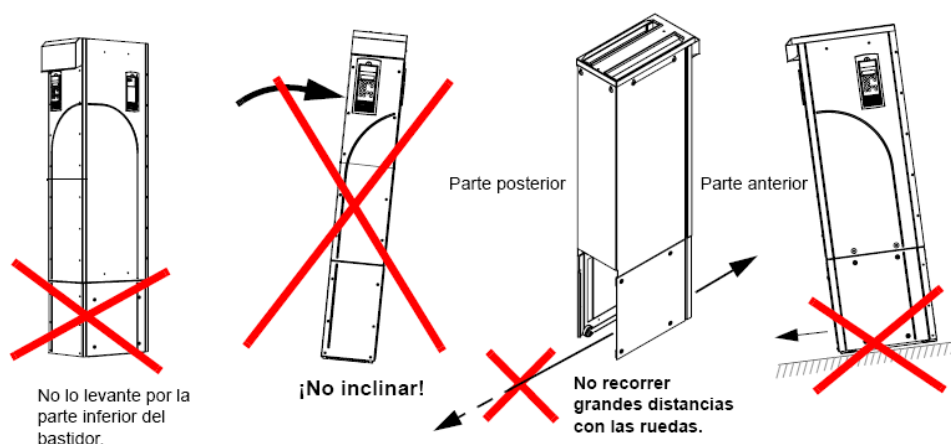


Figura 5. 3 Inclinación peligrosa del variador de velocidad.

- El convertidor debe ser trasladado empleando solamente sus ruedas en caso de instalación. Es aconsejable trasladarlo hacia delante por la mayor estabilidad que brindan sus ruedas delanteras.
- Si se retira el pedestal, el bastidor del convertidor podría resultar deformado si se lo transporta usando solamente sus ruedas; para desplazar al convertidor una gran distancia es necesario usar una carretilla elevadora, apoyándolo en su parte posterior.
- Se deben reconocer las condiciones ambientales para la instalación con el objetivo de identificar algún posible inconveniente de funcionamiento.

Altitud: 2800 metros

Temperatura promedio de funcionamiento: 15°C

Humedad relativa: 70%

Ambiente: polvo de cemento no corrosivo

Clase de protección: Armario IP55

Debido a los requisitos de ventilación para el variador de velocidad, se instalaron en el armario: dos ventiladores que inyectan aire frío hacia el variador y dos extractores

que sacan el aire caliente proveniente del equipo tal como se ilustra en las Fig. 5.4 y Fig. 5.5.



Figura 5. 4 Extractores en la parte superior del armario

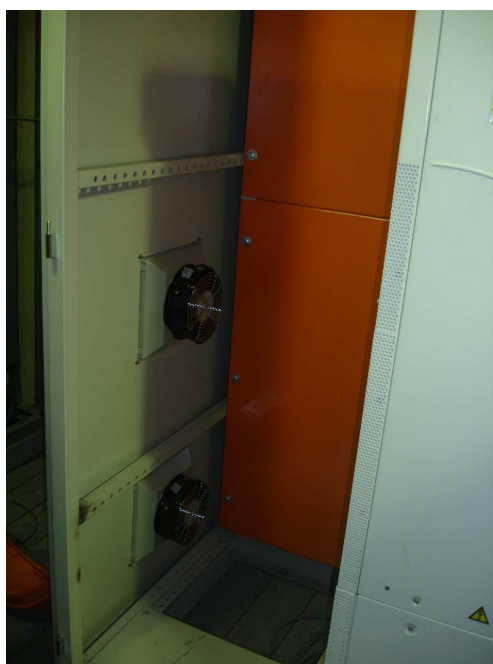


Figura 5. 5 Ventiladores en la parte inferior del armario

Una vez consideradas todas las recomendaciones mencionadas, se procedió al montaje del convertidor dentro del armario.

Para facilitar el cableado de fuerza hacia el convertidor y desde éste al motor, es necesario extraer el pedestal del bastidor del variador de velocidad y anclarlo al piso del armario como se muestra en la Fig. 5.6.



Figura 5. 6 Montaje del pedestal del variador de velocidad

Una vez que el pedestal se ha fijado al piso del armario, es factible conectar los cables de potencia, siguiendo las siguientes recomendaciones:

Los cables de entrada al convertidor, son de calibre 3/0 AWG por fase, tipo THW, debido a que no se llevan los cables por tuberías, así como los cables de alimentación al motor.

Para la conexión de los cables de potencia, se siguió el procedimiento detallado a continuación:

- Introducir los cables en el armario a través de las entradas de cable habilitadas.
- Deslizar las arandelas por los cables.
- Cortar los cables para que tengan la longitud adecuada.
- Terminar los conductores con terminales de cable o conectores.
- Conectar los apantallamientos de los cables a la barra de distribución PE.

- Conectar los conductores de fase del cable a motor a los terminales U2, V2 y W2.
- Conectar los conductores de fase del cable de alimentación a los terminales U1, V1 y W1.

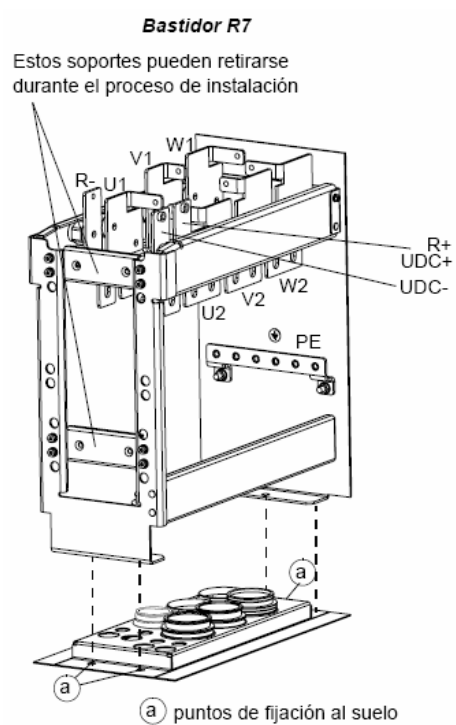


Figura 5. 7 Pedestal para el cableado de fuerza y control hacia el variador de velocidad



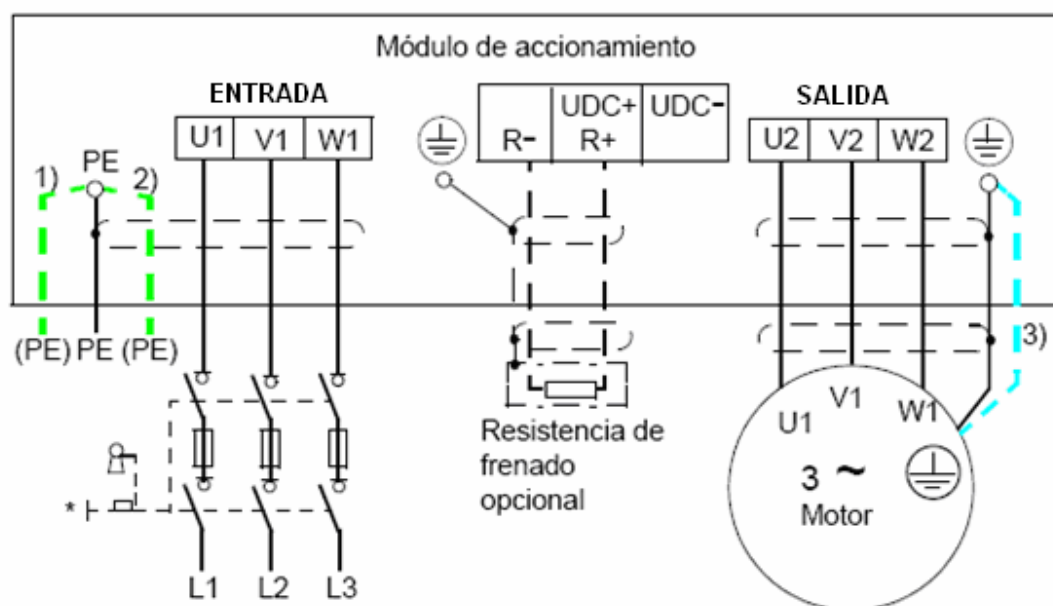


Figura 5. 8 Diagrama de conexión de los cables de potencia

Posterior a la conexión de los cables de potencia, y con los cables de control listos para ser conectados a las tarjetas dentro del variador de velocidad, se procedió al montaje del bastidor dentro del armario para poder conectarlo con el pedestal.



Figura 5. 9 Armario del variador de velocidad sin pedestal

Una vez que se montó al bastidor dentro del armario, se lo fijó al pedestal usando los pernos que dispone el convertidor para ello. De esta manera el bastidor queda anclado al piso del armario y las barras de corriente conectadas.

Con los cables de potencia conectados y el bastidor correctamente instalado, se conectaron todos los cables de control, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Todos los cables de control deberán estar apantallados.
- Se debe utilizarse un cable de par trenzado doblemente apantallado para las señales analógicas, de calibre # 18 AWG.

- La mejor alternativa para las señales digitales de bajo voltaje es un cable con pantalla doble, pero también puede utilizarse cable de varios pares trenzados con pantalla única, de calibre # 18 AWG. Las señales analógicas y digitales deben transmitirse a través de cables apantallados separados.
- Las señales controladas por relé pueden transmitirse por el mismo cable que las señales de entrada digital, siempre que su tensión no sobrepase los 48 V. Se recomienda que las señales controladas por relé se transmitan a través de un par trenzado.
- Nunca deben mezclarse señales de 24 V CC y 115 / 230 V CA en el mismo cable. Para las salidas de relé se recomienda el uso de cable con apantallamiento metálico trenzado.
- En todos los casos, el apantallamiento se deberá conectar a la tierra de las borneras de control del convertidor.
- El cable al motor debe instalarse apartado de otros recorridos de cable. Se recomienda que el cable al motor, el cable de la red y los cables de control se instalen en bandejas separadas. Debe evitarse que el cable a motor corra paralelo a otros cables durante un trayecto largo, para reducir las interferencias electromagnéticas producidas por los cambios rápidos en la tensión de salida del variador de velocidad.
- En los puntos en que los cables de control deban cruzarse con los cables de potencia, asegúrese de que lo hacen en un ángulo lo más próximo posible a los 90 grados. Por el convertidor no deberán pasar otros cables adicionales.

A continuación en la figura 5.10 se muestra un diagrama correcto del recorrido de cables.

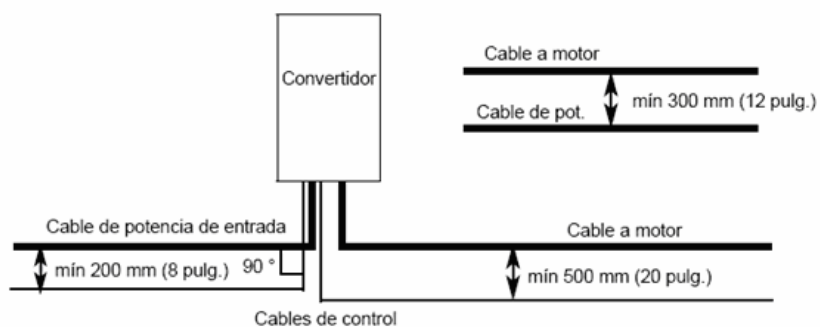


Figura 5. 10 Recorrido de cables de control y potencia

### *Interruptor automático*

La instalación del interruptor automático dentro del armario se la hizo sobre un riel, el cual está anclado a la pared posterior del armario, de tal manera que se mantengan las dimensiones de espacio libre que deban quedar entre el variador y cualquier otro elemento próximo a él.

Previo al montaje del interruptor en el armario, se instaló el relé de mínimo voltaje (UVR) y los contactos auxiliares para señalización del estado del interruptor (abierto/cerrado/en disparo). Dichos contactos se conectaron a luces piloto montadas sobre la puerta del armario como se muestra en la Fig. 5.11.

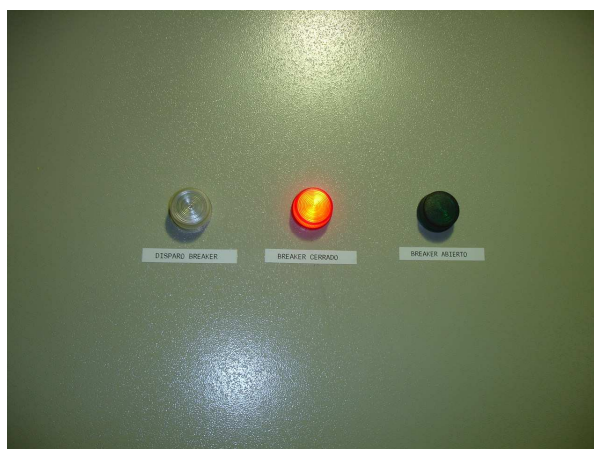


Figura 5. 11 Luces piloto de señalización del estado del interruptor

Luego de esto, se instaló el interruptor sobre el riel dentro del armario para poder conectar los cables de potencia de entrada y salida para alimentación al convertidor, los cuales están instalados dentro de canaletas plásticas dentro del armario. Fig. 5.12

Los cables de control tanto para el relé de mínima tensión como para los contactos auxiliares se conectaron a borneras colocadas junto al interruptor.

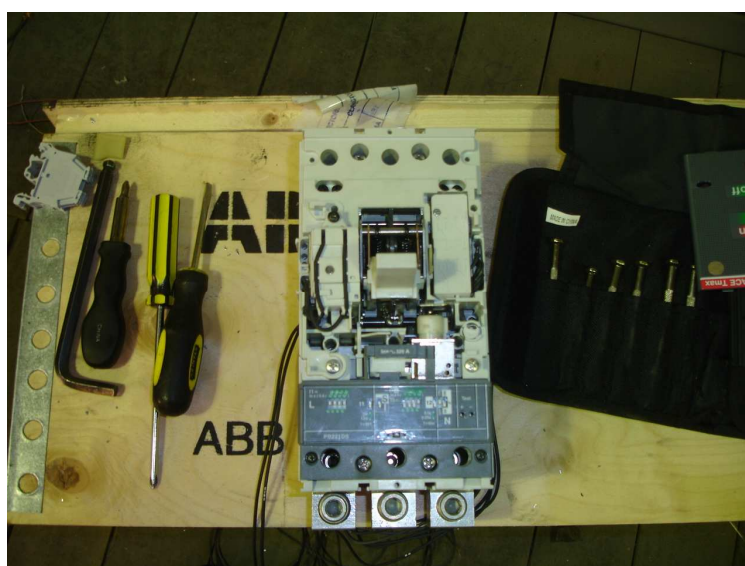


Figura 5. 12 Instalación de accesorios dentro del interruptor.

### *Panel de Control de Operador*

De acuerdo con la lógica de control requerida por Eternit S.A., el panel para el manejo del sistema de rodillos contiene los siguientes elementos:

- Un pulsante de marcha
- Un pulsante de paro
- Un pulsante para paro de emergencia
- Un potenciómetro de precisión para cambiar la velocidad del sistema
- Un indicador digital
- Luces piloto señalizando el estado del variador de velocidad.

Debido a razones de espacio físico disponible, el tablero de control para el sistema de rodillos, está compartido con otras actividades del proceso.

El tablero de control está montado junto al rodillo laminador, desde ahí el operador puede cambiar y visualizar la velocidad del sistema de rodillos según la Fig. 5.13.

Todas las entradas y salidas disponibles del variador de velocidad están cableadas desde éste hasta borneras colocadas dentro del tablero de control, de este modo si en cualquier instante se desea modificar en algo la lógica de control, todo el cableado se lo podrá hacer en el mismo tablero de control.

Para la señalización del estado del variador de velocidad, se utilizaron dos salidas de relé de la tarjeta de control del mismo, conectadas a luces indicadoras en el tablero de control. La otra salida de relé disponible, se utilizó para comandar a la bobina del contactor que alimenta a la bomba de aceite para lubricación de la caja reductora de velocidad. El detalle de las conexiones mencionadas se encuentra en el anexo A-2.



Figura 5. 13 Tablero de control de operación del sistema de rodillos

## 5.2 PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

Una vez que todos los equipos estuvieron correctamente instalados en el armario, se configuró el variador de velocidad y el interruptor automático para arrancar el sistema.

Previo a la configuración del variador de velocidad, se requiere hacerlo funcionar con el motor para realizar la Magnetización de ID para que el variador pueda adquirir los parámetros internos del motor necesarios para el control DTC que usa este variador de velocidad, actividad que se realizó previamente al montaje del motor con la carga aún sin acoplar al eje del motor. Adicionalmente, para la configuración del variador de velocidad se requiere los datos de placa del motor de inducción, así como los límites de operación requeridos del proceso.

La lógica de operación del sistema se mantiene con respecto al antiguo sistema y sigue siendo manejado por un operador manualmente. Teniendo en cuenta la aplicación y el tipo de operación, se programó el variador de velocidad con los parámetros expuestos en el Anexo C-1.

El interruptor automático para protección del sistema de fuerza también fue configurado usando los mini interruptores (dip switches) de que dispone ver Fig. 5.14. La configuración final es la siguiente:

- Protección contra sobrecarga      L:  $0.84 \times I_n$ , 12 seg
- Protección contra cortocircuito    I:  $5.5 \times I_n$ , 1 seg
- Protección del neutro                N: 100%

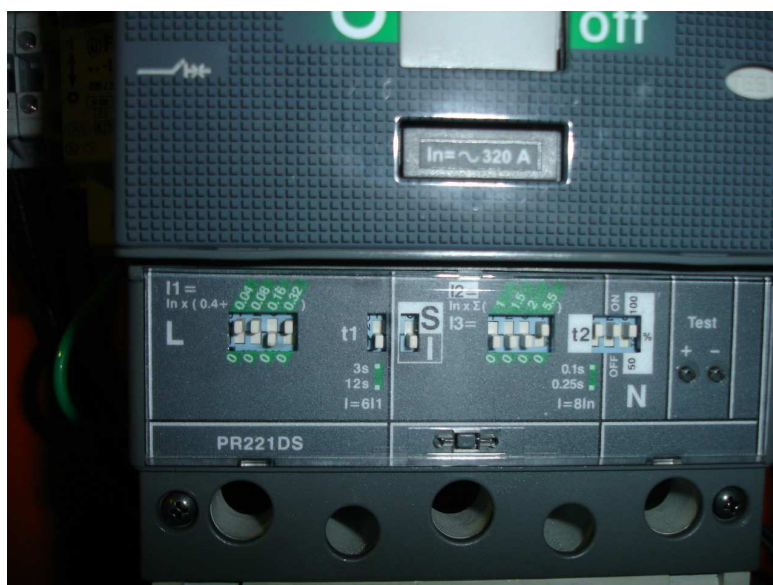


Figura 5. 14 Calibración de protecciones del interruptor automático

### 5.3 COSTOS DEL PROYECTO



A continuación se resume el costo aproximado de los equipos usados en el proyecto.

<b>EQUIPOS</b>	
Equipos de protección	\$ 2.000
Variador de velocidad	\$ 9.000
Motor de inducción	\$ 10.000
Caja reductora	\$ 5.000
Cable	\$ 1.000
Borneras y adicionales	\$ 400
Pulsantes, selectores y luces de señalización	\$ 150
Indicador digital	\$ 700
<b>TOTAL DEL PROYECTO</b>	<b>\$ 28.250</b>

El resumen no incluye costos de ingeniería por haber sido desarrollada para el presente proyecto de titulación.

# CAPÍTULO 6

## ANÁLISIS DEL TORQUE DE CARGA DEL MOTOR

La parte fundamental de este proyecto era controlar la velocidad del rodillo laminador para la producción de planchas de fibrocemento; en los capítulos anteriores se trató sobre el desarrollo e implementación de la lógica de control.

En este capítulo se realiza un estudio del comportamiento del motor durante el proceso, aprovechando la posibilidad de obtener las variables características del motor de inducción que brinda el variador instalado.

### 6.1 DEFINICIONES

Los motores de inducción son de uso generalizado en la industria y los hay monofásicos o trifásicos, a continuación se describen algunas de sus características básicas.

#### *Deslizamiento*

Un motor de inducción convierte energía eléctrica en energía mecánica y debido a su principio de funcionamiento, la velocidad de giro del rotor es menor que la velocidad de giro del campo magnético giratorio producido en el estator, el mismo que gira con una velocidad llamada de sincronismo  $n_s$  que es función de la frecuencia y del número de polos.

$$n_s = \frac{2 \times f_n \times 60}{\# \text{ de polos}}$$

Se conoce como deslizamiento  $s$  a la diferencia entre la velocidad sincrónica y la del rotor, dividida para la velocidad sincrónica.

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} \times 100\%$$

El deslizamiento suele definirse para las condiciones nominales del motor (frecuencia ( $f_n$ ), velocidad ( $n_n$ ), torque ( $T_n$ ), voltaje ( $U_n$ ), corriente ( $I_n$ ) y potencia ( $P_n$ )).

En general el deslizamiento expresa el estado de carga del motor, mientras más carga mecánica tiene el eje el deslizamiento es mayor.

Cuando una máquina de inducción funciona como acción motor, el deslizamiento tiene valores positivos entre cero y cercano a la unidad y cuando lo hace como acción generador, el deslizamiento se hace negativo y varía entre 0 y menos uno.

### *Torque*

Cuando se aplica una fuerza en algún punto de un cuerpo rígido, el cuerpo tiende a realizar un movimiento de rotación en torno a algún eje. La propiedad de la fuerza para hacer girar al cuerpo se mide con una magnitud física que se llama torque o momento de la fuerza.

El torque en un motor de inducción es un momento de fuerza generado por la interacción de los campos electromagnéticos del estator y del rotor, producidos por las corrientes que circulan en los respectivos devanados generando un movimiento de rotación en torno a su eje.

El torque máximo de un motor de inducción estándar  $T_{max}$ , también llamado par de actuación o par crítico suele ser de 2 a 3 veces mayor que el torque nominal disponible con deslizamiento  $s_{max}$ , que es superior al deslizamiento nominal.

Cuando un motor está conectado a una fuente de alimentación con tensión y frecuencia constantes, presenta la curva de torque mostrada en la Fig. 6.1:

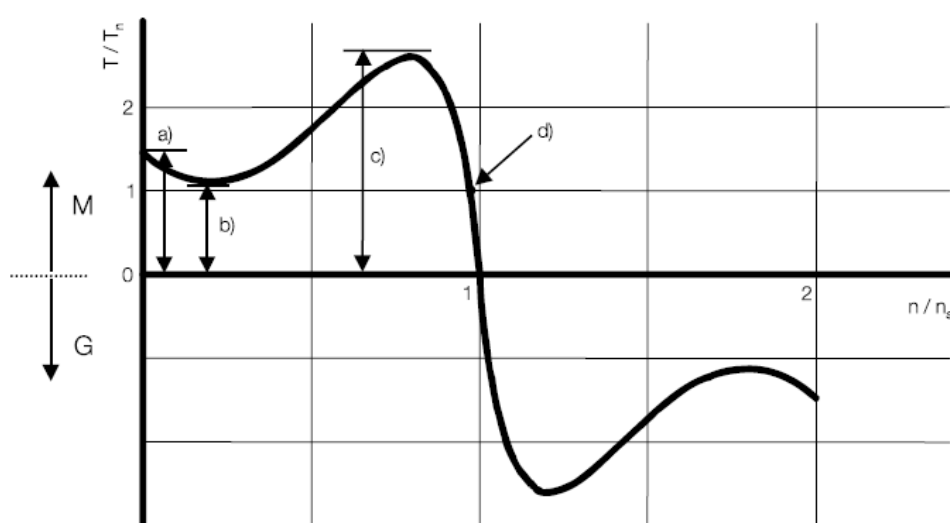


Figura 6. 1 Curva de par/velocidad típica de un motor de inducción conectado directamente a la red de alimentación. En el gráfico, a) es el par del rotor bloqueado, b) es el par de actuación, c) es el par máximo del motor,  $T_{max}$  y d) es el punto nominal del motor.

Cuando se controla un motor de inducción con un variador de velocidad este puede trabajar eficientemente dentro del rango comprendido entre  $-s_{max}... s_{max}$ . Fig. 6.2.

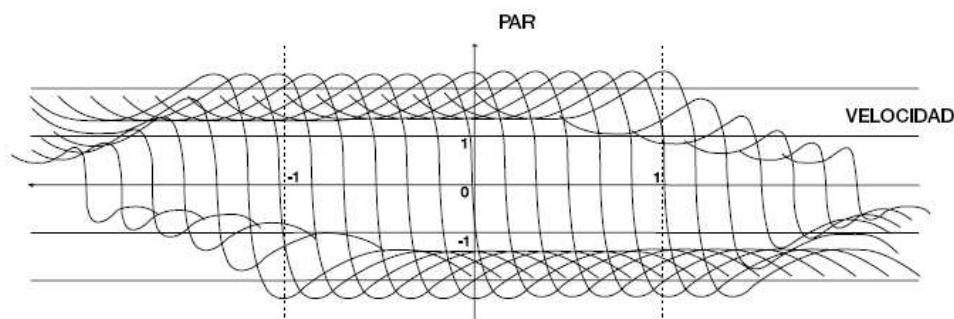


Figura 6. 2 Curvas de par/velocidad de un motor de inducción alimentado por un convertidor de frecuencia.

El torque máximo de un motor de inducción es proporcional al cuadrado del flujo magnético ( $T_{\max} \sim \psi^2$ ) lo que significa que el torque máximo es aproximadamente una constante en el rango de flujo constante. Por encima del punto de debilitamiento del campo es decir sobre la velocidad nominal del motor, la reducción del torque máximo es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia como se ilustra en la figura 6.3

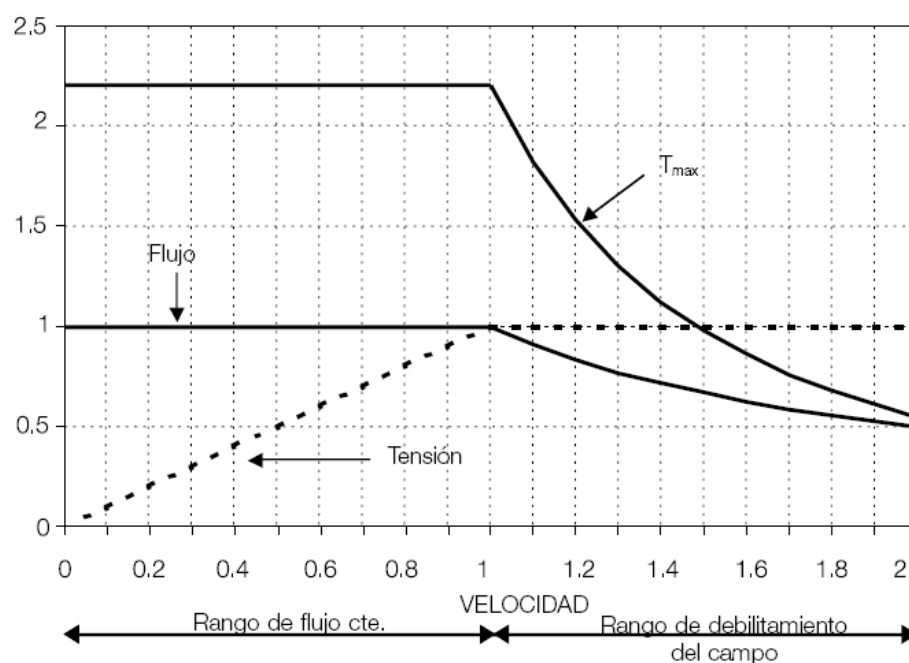


Figura 6. 3 Par máximo, tensión y flujo en función de la velocidad relativa.

### *Corriente del motor*

La corriente del motor se encuentra detallada en el Capítulo 3 Diseño del circuito de fuerza y control – Dimensionamiento del variador de velocidad.

### *Potencia activa del motor*

La potencia mecánica del motor (potencia de salida) puede calcularse a partir de la velocidad y el torque, mediante la fórmula:

$$P_{out} [w] = T [Nm] \times \omega [rad / s]$$

$$P_{out} [Kw] = \frac{T [Nm] \times n [rpm]}{9550}$$

La potencia de entrada al motor puede calcularse a partir del voltaje y la corriente:

$$P_{in} [w] = \sqrt{3} \times U [V] \times I [A] \times \cos(\varphi)$$

El rendimiento del motor es igual al cuociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

### *Tipos de carga*

En la industria existen diferentes tipos de cargas mecánicas, siendo esencial conocer el perfil de carga como: rango de velocidad, torque y potencia para poder seleccionar un motor y un convertidor de frecuencia adecuados. Los tipos más comunes de carga son:

**Par constante.-** El torque de carga del motor es constante y la potencia es linealmente proporcional a la velocidad. Por ejemplo, compresores de tornillo, cintas transportadoras, montacargas son aplicaciones típicas a par constante. Ver Fig. 6.4.

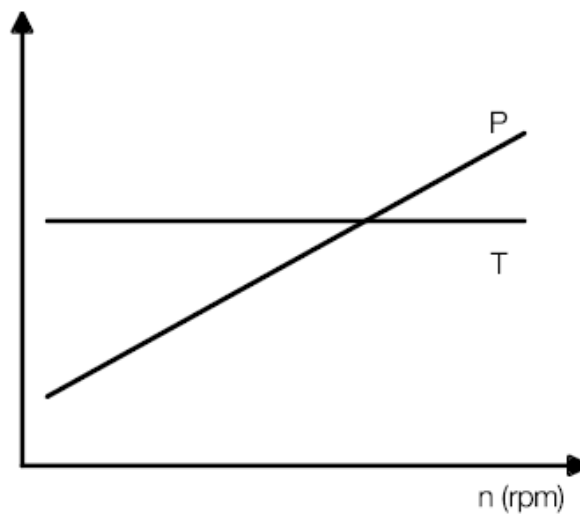


Figura 6. 4 Curva de carga de torque constante.

**Par cuadrático.-** El torque es cuadráticamente proporcional a la velocidad, y la potencia lo es cúbicamente, siendo el tipo de carga más común. Las aplicaciones típicas son bombas y ventiladores centrífugos según la Fig. 6.5.

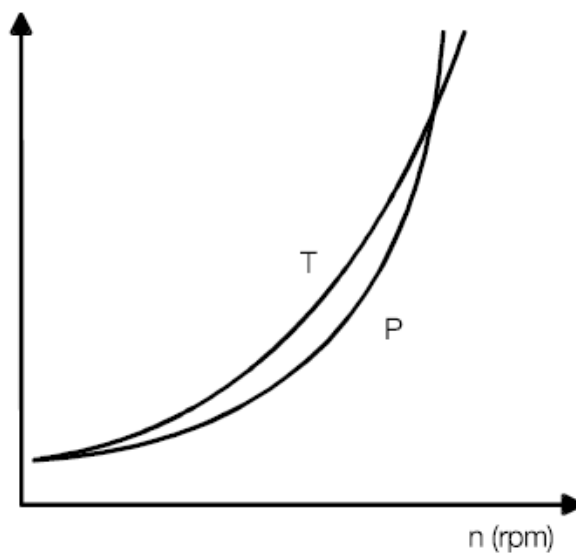


Figura 6. 5 Curva de carga de torque cuadrático.



**Potencia constante.-** La potencia es constante y el torque es inversamente proporcional a la velocidad. Una carga típica de este tipo es la bobinadora de cable que aumenta su diámetro a medida que el material se va enrollando. La curva de potencia constante vs. velocidad se puede ver en la Fig. 6.6.

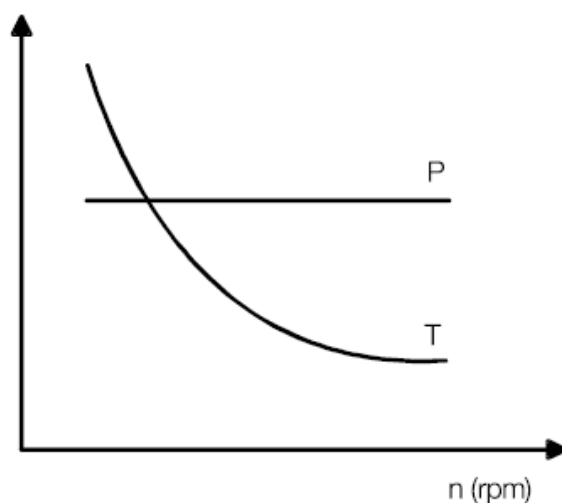


Figura 6. 6 Curva de carga de potencia constante.

**Potencia/par constante.-** Es una combinación de los tipos de cargas de potencia y torque constante comunes en la industria papelera. Este tipo de carga es consecuencia de sistemas que requieren potencia a velocidades sobre la nominal y alto torque a bajas velocidades de acuerdo a la Fig. 6.7.

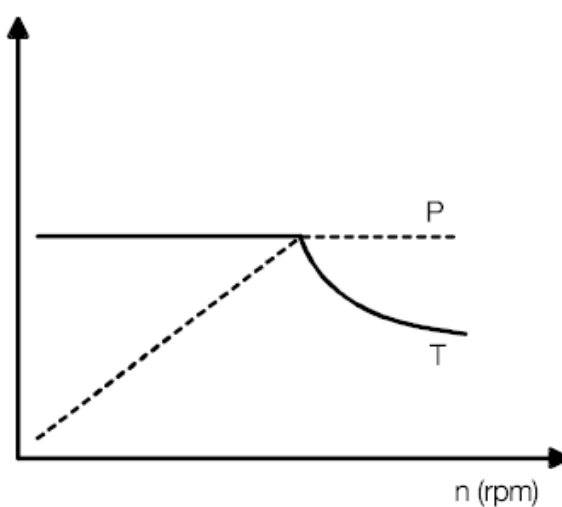


Figura 6. 7 Curva de carga de potencia y torque constante.

## 6.2 METODOS DE CONTROL DE VELOCIDAD

Existen tres métodos de control de velocidad con los que generalmente trabajan los variadores de velocidad para motores de inducción:

- **Control Escalar.**- que se basa en el control de frecuencia con un modulador de ancho de pulsos PWM en lazo abierto.
- **Control Vectorial.**- que usan la misma técnica que el control escalar pero cerrando el lazo de control con un codificador de pulsos para poder obtener una mejor precisión de torque y velocidad.
- **Control de Torque Directo.**- ABB trabaja usando una nueva técnica de control basada en el modelo matemático del motor, llamado DTC con la cual se puede obtener información de la posición exacta de su eje sin necesidad de dispositivos de retroalimentación y usando como variables de control el flujo magnético y el torque.

### 6.2.1 CONTROL DE FRECUENCIA CON PWM

La técnica del control de la frecuencia con PWM utiliza como variables de control parámetros generados fuera del motor, concretamente el voltaje y la frecuencia.

La referencia de el voltaje y de la frecuencia es introducida en un modulador que simula una onda sinusoidal de CA con la cual se alimenta el bobinado del estator del motor, está constituida por un rectificador de diodos que hace que la tensión de CC intermedia permanezca constante y un inversor que controla la tensión y la frecuencia del motor a modo de un tren de pulsos.

Este método no utiliza un dispositivo de retroalimentación y se denomina "accionamiento en lazo abierto" o "control escalar" según la Fig. 6.8.

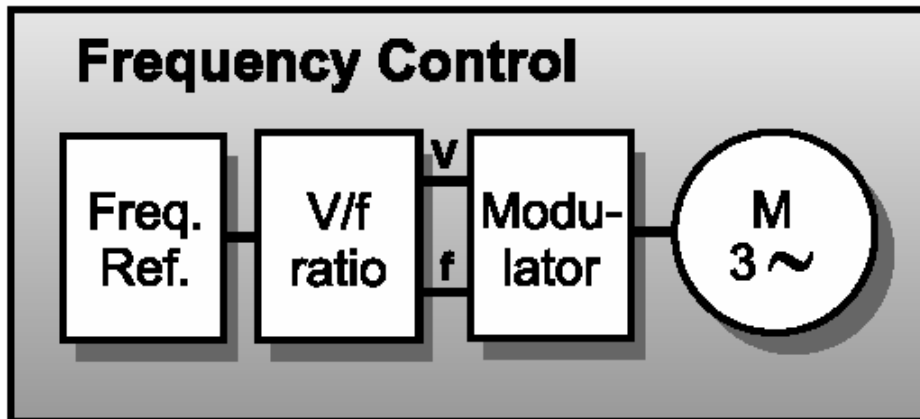


Figura 6. 8 Lazo de control de un accionamiento de CA con control de frecuencia con PWM

#### *Ventajas*

Dado que no existe un dispositivo de retroalimentación, el principio de control ofrece una solución simple de bajo coste para controlar los motores de inducción de CA. Este tipo de accionamiento es apto para aplicaciones que no requieren una alta precisión, tales como bombas o ventiladores.

#### *Desventajas*

En esta técnica la frecuencia y el voltaje son las variables de control principales que se aplican al bobinado del estator, por lo que al ignorar el estado del rotor no puede controlar el torque del motor con precisión.

Además, la respuesta del motor es muy lenta a los cambios de voltaje y frecuencia dados por el modulador.

### 6.2.2 CONTROL DEL VECTOR DE FLUJO MEDIANTE PWM

La principal característica de este accionamiento es que el conocimiento de la velocidad del rotor y su posición angular se obtienen mediante un codificador de pulsos que cierra el lazo control y lo hace más preciso, por lo que se denomina "accionamiento en lazo cerrado" o "control vectorial". El diagrama de bloques se muestra en la Fig. 6.9.

Además, las características eléctricas del motor se modelan matemáticamente con microprocesadores creando cantidades eléctricas tales como: voltaje, corriente y frecuencia que son las variables que controlan al motor de inducción mediante un modulador de ancho de pulso PWM.

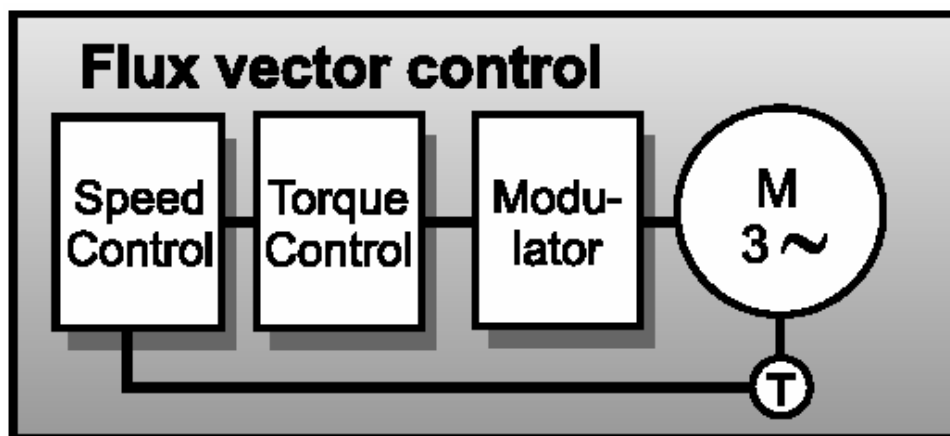


Figura 6. 9 Lazo de control de un accionamiento de CA con control del vector de flujo con PWM

#### *Ventajas*

Este control puede alcanzar el torque nominal del motor a velocidad cero, es decir buena respuesta del torque con un control preciso de la velocidad.

### *Desventaja*

Se requiere de un dispositivo de retroalimentación para obtener precisión en el control, complica al motor de inducción y puede resultar costoso. Asimismo, la respuesta del motor es lenta a las señales de entrada de tensión y frecuencia.

A pesar de que el motor es simple desde el punto de vista mecánico, el accionamiento es complejo desde el punto de vista eléctrico.

### **6.2.3 CONTROL DIRECTO DE TORQUE DTC**

El variador de velocidad ABB ACS800-02-0210-5, utilizado para el presente proyecto, trabaja usando la tecnología de control directo del torque DTC, en la cual la posición del eje del motor se obtiene a través de un modelo matemático real generado por el variador de velocidad sin la necesidad de realimentación. Las variables de control que utiliza esta técnica son el flujo magnético y el torque que son datos internos del motor. Ver Fig. 6.10.

Por lo tanto la respuesta de torque es 10 veces más rápida que la de cualquier accionamiento de CA y la precisión es 8 veces superior a la de un accionamiento en lazo abierto y comparable a la de un accionamiento que utilice retroalimentación.

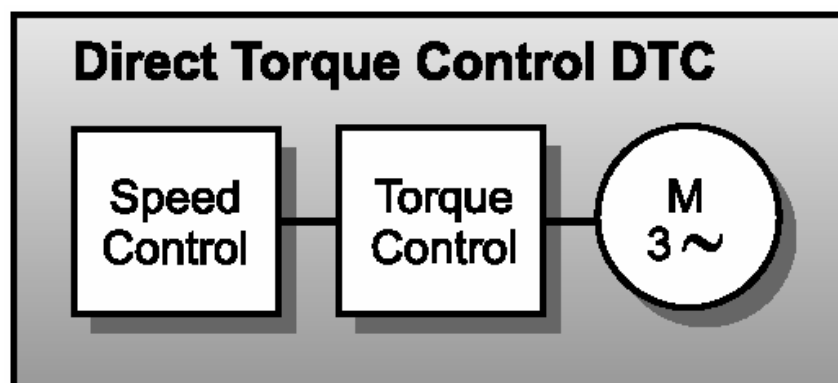


Figura 6. 10 Lazo de control de un accionamiento de CA con DTC

La respuesta del 100% de torque por debajo de 40 Hz con una repetitibilidad del 1 al 2% es de 1 a 2 ms en comparación a los 10 ms de los accionamientos de vector de flujo y con los accionamientos PWM en lazo abierto el tiempo de respuesta es superior a los 100ms.

La precisión de la velocidad con control DTC es el 10% del deslizamiento del motor, en caso de que un proceso lo requiera el variador de velocidad puede trabajar con un codificador de 1024 pulsos/revolución alcanzando una precisión de velocidad del 0,01%.

### **6.3 APLICACIÓN DE VARIADORES CON TECNOLOGÍA DTC**

Como se explicó en el Capítulo 1 las dimensiones físicas del rodillo laminador determinan las características del producto a fabricar, es decir si se requiere elaborar tejas de mayor longitud será necesario utilizar un rodillo laminador de mayor diámetro.

Las pruebas fueron realizadas con dos rodillos laminadores que Eternit S.A. utiliza para los productos que presentan mayor demanda. Los datos de placa del motor de inducción y las características de los rodillos laminadores son las siguientes:

Motor	Potencia	Voltaje	Corriente	Torque	Frecuencia	Velocidad
M3BP315SMA4	125 Kw	440 V	199 A	668 Nm	60 Hz	1786 rpm

Tabla 6. 1 Datos de placa del motor de inducción

Datos \ Rodillos	Rodillo laminador 1	Rodillo laminador 2
Diámetro	16 pies	20 pies
Peso	2 toneladas	5 toneladas
Ancho	2 metros	2 metros

Tabla 6. 2 Características de los rodillos laminadores

Los datos se obtuvieron con el software Drive Window que sirve básicamente para la programación de parámetros y adquisición de datos del variador el cual se comunica con el computador a través de un enlace de fibra óptica, cuyo detalle se explica en el anexo D-1

La información indicada a continuación fue tomada en la puesta en marcha del sistema y durante la operación normal de la planta, para cada uno de los rodillos.

## OPERACIÓN DEL SISTEMA DURANTE EL ARRANQUE

*Rodillo laminador 1 (2 toneladas)*

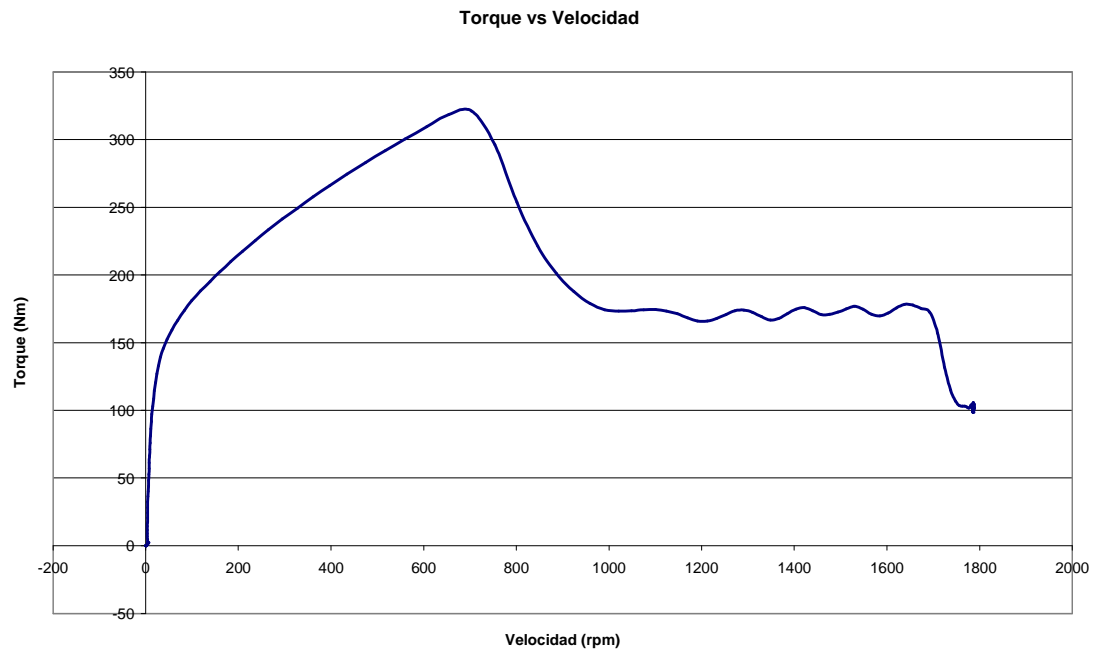


Figura 6. 11 Curva Torque vs. Velocidad rodillo laminador 1 (2 toneladas)

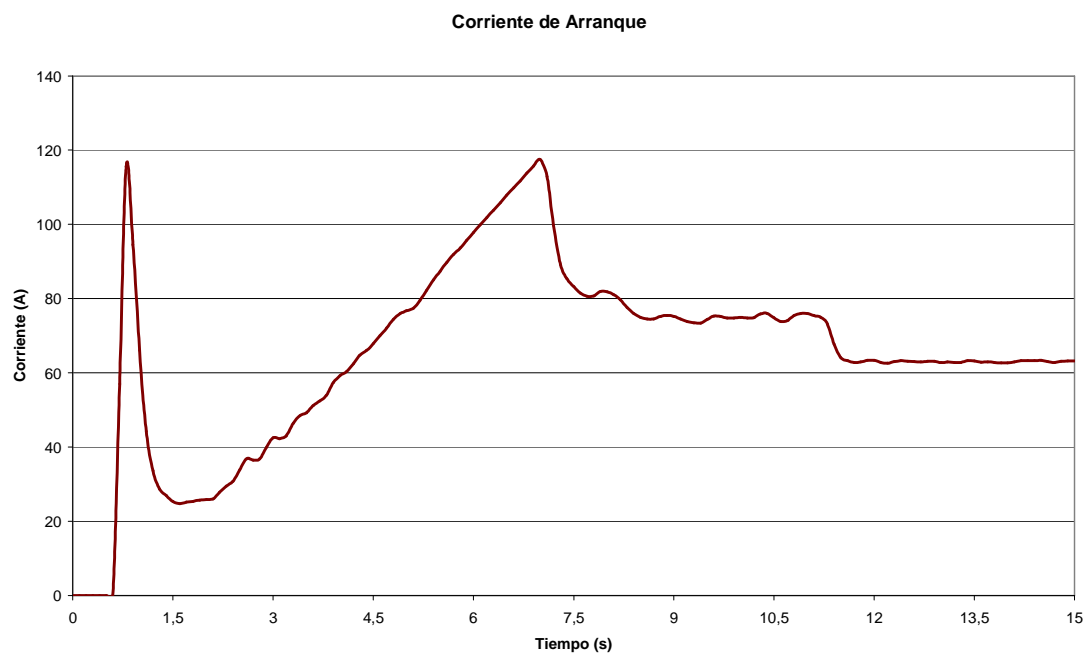


Figura 6. 12 Curva de corriente de arranque rodillo laminador 1 (2 toneladas)



Para poder arrancar el sistema al trabajar con el rodillo laminador 1, cuyo peso es 2 toneladas, se necesita un torque máximo de 331.19 Nm que es aproximadamente el 50% del torque nominal del motor; luego de vencer la inercia de la carga el torque se estabiliza en un valor constante de acuerdo a la Fig. 6.11.

Cuando se arranca un motor de corriente alterna utilizando un variador de velocidad el pico de corriente que se genera no supera el valor de la corriente máxima que es capaz de entregar el variador de velocidad, en este caso 384 A.

En la curva de la Fig. 6.12 se puede observar dos picos de corriente, el primero con un valor de 115.61 A que representa la magnetización del motor para poner rígido el eje del mismo de modo que se minimice el estrés del arranque venciendo la inercia de la carga y el segundo pico de corriente con un valor de 117.46 A que es utilizado para iniciar el giro del eje del motor, se eleva suavemente evitando los inconvenientes que se presentarían con otros métodos de arranque.

#### *Rodillo laminador 2 (5 toneladas)*

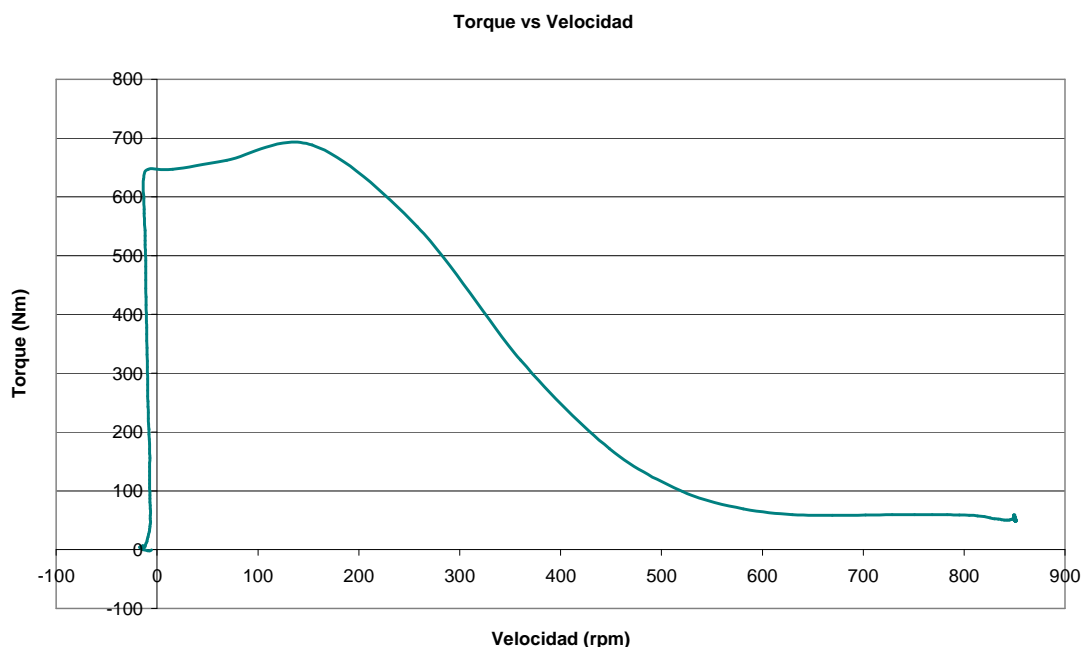


Figura 6. 13 Curva Torque vs. Velocidad rodillo laminador 2 (5 toneladas)

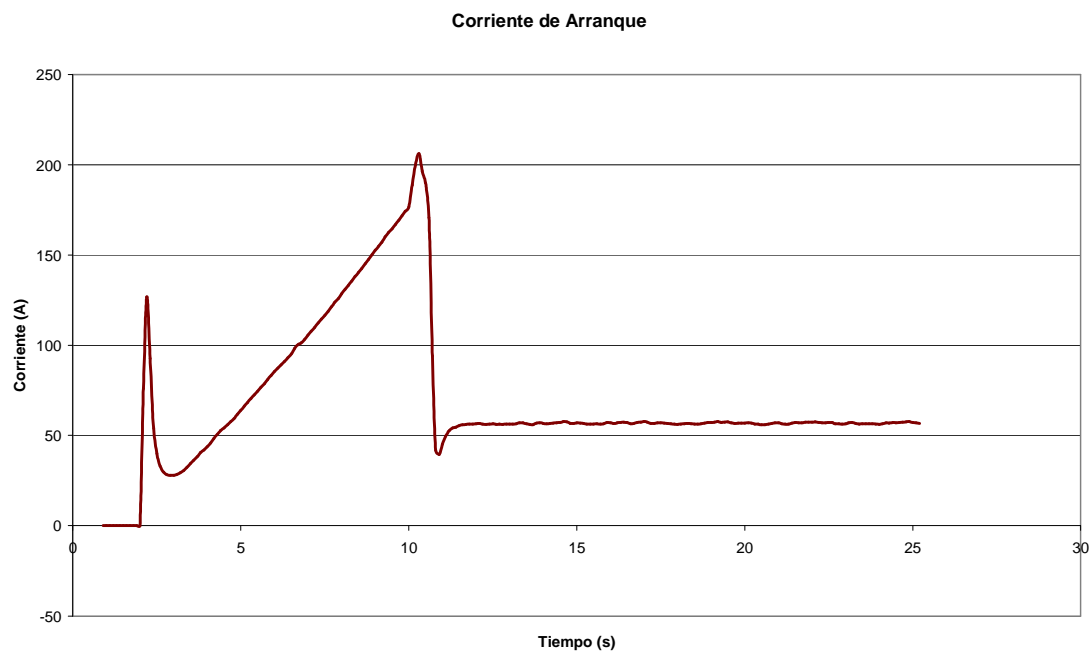


Figura 6. 14 Curva Corriente de arranque rodillo laminador 2 (5 toneladas)

A diferencia del rodillo laminador 1 (2 toneladas), esta carga durante el arranque requiere un valor de torque de 668.14 Nm que es igual al torque nominal del motor, ya que por las características indicadas anteriormente del rodillo laminador 2 (5 toneladas), la inercia que tiene que vencer el motor es más alta. Fig. 6.13.

De la misma manera que para el rodillo laminador 1 (2 toneladas) se puede observar en la Fig. 6.14 dos picos de corriente durante el arranque, el primero con un valor de 126.69 A y el segundo con un valor de 206.12 A, alcanzando un 103.5% de la corriente nominal del motor, debido a las características físicas de la carga.

## OPERACIÓN DEL SISTEMA EN RÉGIMEN PERMANENTE

Para realizar una comparación del comportamiento del sistema para las cargas utilizadas, se realizaron cálculos teóricos aproximados.

*Rodillo laminador 1 (2 toneladas)*

Se calcula la corriente y el torque teóricamente a través del modelo matemático aproximado del motor dado como dato de las especificaciones del fabricante (referirse al Anexo B-3) y datos de las variables del proceso, se tiene:

Datos \ Rodillos	Rodillo laminador 1 (2 toneladas)
Voltaje de entrada al motor	358.48 V
Frecuencia	48.52 Hz
Velocidad del motor	1465 rpm
$R_1$ (resistencia estatórica)	0.0174 $\Omega$
$R_2$ (resistencia retórica)	0.0107 $\Omega$
$X_1$ (reactancia estatórica)	0.091 $\Omega$
$X_2$ (reactancia retórica)	0.348 $\Omega$

Tabla 6. 3 Variables del proceso y datos del modelo matemático del motor

$$I_2(\text{modulo})[A] = \frac{V_1[V]}{\sqrt{\left(R_1[\Omega] + \frac{R_2[\Omega]}{s}\right)^2 + (X_1[\Omega] + X_2[\Omega])^2}}$$

$$s = \frac{N_s[\text{rpm}] - N_r[\text{rpm}]}{N_s[\text{rpm}]}$$

$$N_s = \frac{120 \times f}{\# \text{ de polos}}$$

$$N_s [\text{rpm}] = \frac{120 \times 48.94 \text{ Hz}}{4}$$

$$N_s = 1468.18 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{1468.18 \text{ rpm} - 1465 \text{ rpm}}{1468.18 \text{ rpm}}$$

$$s = 0.002171$$

$$I_2(\text{modulo}) [\text{A}] = \frac{358.48 \text{ V}}{\sqrt{\left(0.0174 \Omega + \frac{0.0107 \Omega}{0.002171}\right)^2 + (0.091 \Omega + 0.348 \Omega)^2}}$$

$$I_2(\text{modulo}) = 72.29 \text{ A}$$

$$T [\text{Nm}] = \frac{(I_2 [\text{A}])^2}{N_s [\text{rad/s}]} \times \frac{R_2 [\Omega]}{s} = \frac{(72.29 \text{ A})^2}{153.75 \text{ rad/s}} \times \frac{0.0107 \Omega}{0.002171}$$

$$T = 167.54 \text{ Nm}$$

De acuerdo a los datos teóricos calculados la curva de torque se muestra en la Fig. 6.15:

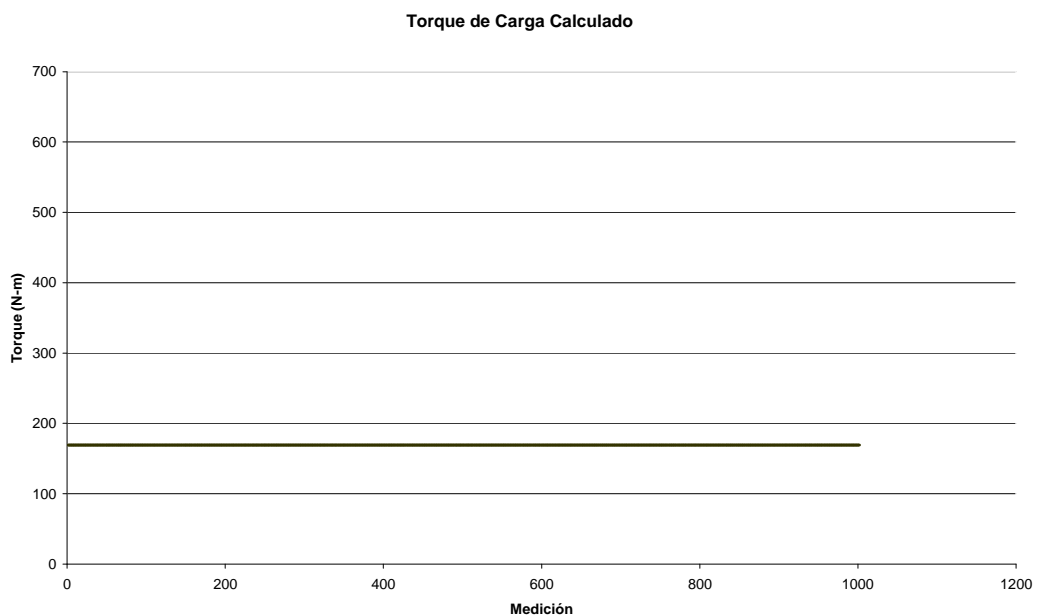


Figura 6. 15 Curva torque de carga rodillo laminador 1 (2 toneladas) con los datos teóricos calculados

Curva de torque medido:

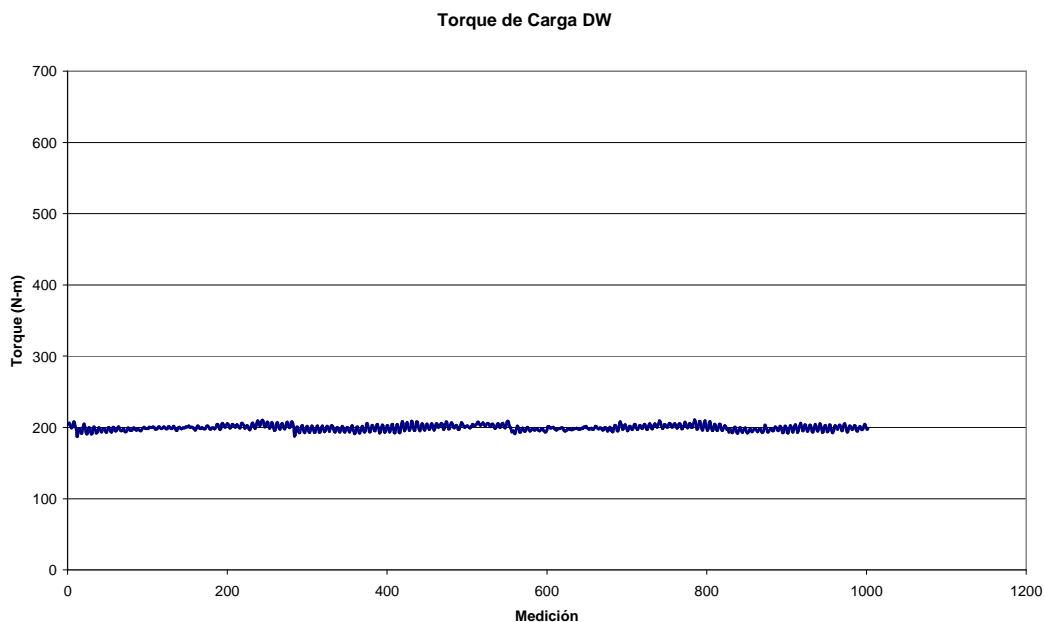


Figura 6. 16 Curva de torque de carga rodillo laminador 1 (2 toneladas) tomada en el proceso

Se puede observar que la curva de torque calculado usando los datos teóricos es constante en un valor de 167.54 Nm Fig. 6.15, a diferencia de la curva de torque tomada en el proceso que presenta pequeñas variaciones alrededor a 200 Nm Fig. 6.16, las mismas que representan la respuesta instantánea de corriente entregada por el variador de velocidad debido a los cambios de la carga manteniendo constante la velocidad del proceso requerida para el producto en fabricación, es decir, que por cada vuelta del rodillo laminador el grosor de la lámina aumenta exigiendo aproximadamente 0.6% del torque nominal.

Entonces, aproximadamente en las cinco vueltas del rodillo laminador por receta de la gama de tejas que se están produciendo existe un aumento del torque de carga en un máximo del 3% del torque nominal.

Teóricamente se expresa que para mantener la velocidad del proceso constante, el voltaje de entrada a los terminales del motor es constante, la corriente calculada es

constante y por ende el torque también lo es; pero para esta carga en particular existe una pequeña variación de corriente cuando al rodillo laminador se le adhiere una capa de pasta en cada vuelta a más del sistema de rodillos y la banda de fieltro que debe mover constantemente; sin un adecuado control por parte del variador de velocidad este efecto causaría oscilaciones en la velocidad del proceso.

El variador de velocidad con la tecnología de control DTC inyecta una variación de corriente del 2% de la corriente nominal entre el valor promedio de 78 A Fig. 6.17 que necesita el motor cada vez que aumenta una capa de pasta en el rodillo laminador para cumplir con el torque manteniendo la velocidad constante.

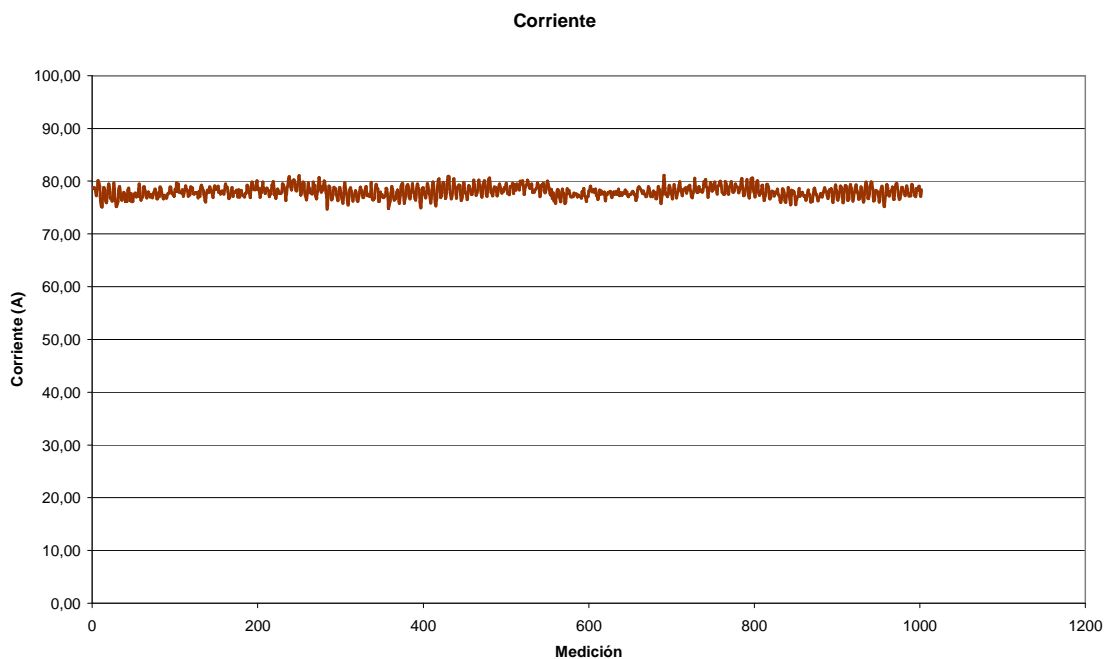


Figura 6. 17 Corriente de entrada en los terminales del motor de inducción

*Rodillo laminador 2 (5 toneladas)*

Teóricamente las variables del proceso para el rodillo laminador 2 (5 toneladas) se expresarían de la siguiente manera:

Datos \ Rodillos	Rodillo laminador 2 (5 toneladas)
Voltaje de entrada al motor	360.8 V
Frecuencia	48.876 Hz
Velocidad del motor	1461 rpm
$R_1$ (resistencia estatórica)	0.0174 $\Omega$
$R_2$ (resistencia retórica)	0.0107 $\Omega$
$X_1$ (reactancia estatórica)	0.091 $\Omega$
$X_2$ (reactancia retórica)	0.348 $\Omega$

Tabla 6. 4 Variables del proceso y datos del modelo matemático del motor

$$I_2(\text{modulo})[A] = \frac{V_1[V]}{\sqrt{\left(R_1[\Omega] + \frac{R_2[\Omega]}{s}\right)^2 + (X_1[\Omega] + X_2[\Omega])^2}}$$

$$s = \frac{N_s[rpm] - N_r[rpm]}{N_s[rpm]}$$

$$N_s = \frac{120 \times f}{\# \text{ de polos}}$$

$$N_s[rpm] = \frac{120 \times 48.876 \text{ Hz}}{4}$$

$$N_s = 1466.28 \text{ rpm}$$

$$s = \frac{1466.28 \text{ rpm} - 1461 \text{ rpm}}{1466.28 \text{ rpm}}$$

$$s = 0.0036$$

$$I_2(\text{modulo})[A] = \frac{360.8V}{\sqrt{\left(0.0174\Omega + \frac{0.0107\Omega}{0.0036}\right)^2 + (0.091\Omega + 0.348\Omega)^2}}$$

$$I_2(\text{modulo}) = 119.83A$$

$$T[Nm] = \frac{(I_2[A])^2}{N_s[\text{rad}/s]} \times \frac{R_2[\Omega]}{s}$$

$$T[Nm] = \frac{(119.83A)^2}{153.55\text{rad}/s} \times \frac{0.0107\Omega}{0.0036}$$

$$T = 277.94Nm$$

De acuerdo a los datos teóricos calculados la curva de torque es la de la Fig. 6.18:

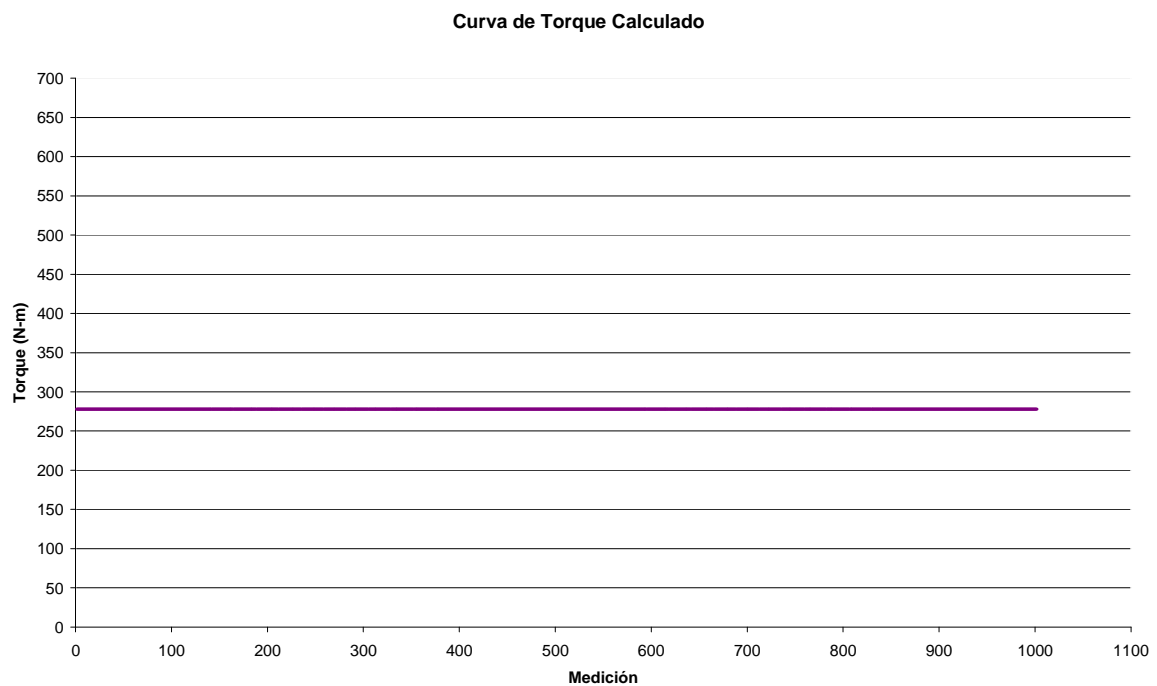


Figura 6. 18 Curva torque de carga rodillo laminador 1 (2 toneladas) con los datos teóricos calculados



Curva real del torque de carga tomada en el proceso es la de la Fig. 6.19:

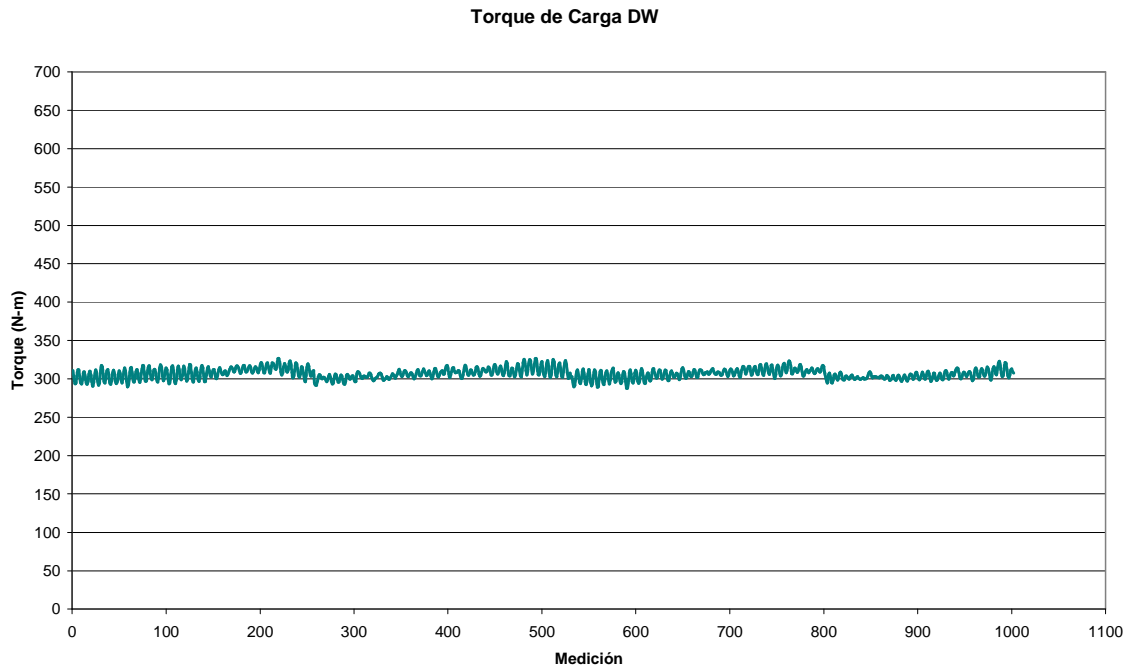


Figura 6. 19 Curva de torque de carga rodillo laminador 2 (5 toneladas) tomada en el proceso

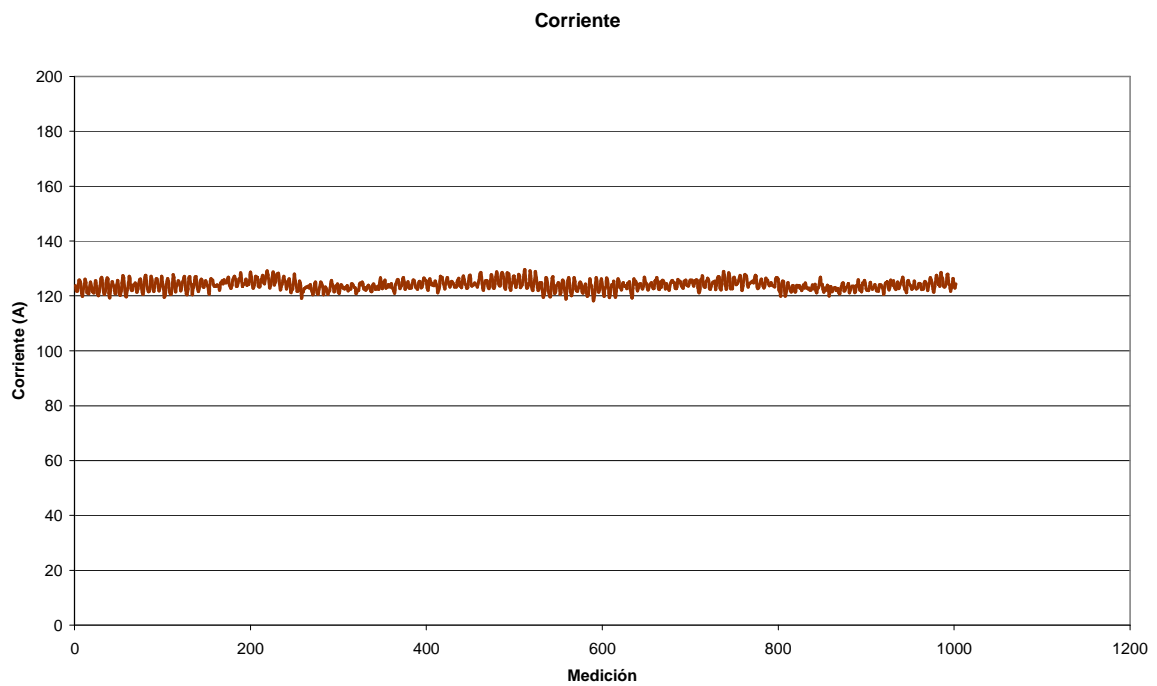


Figura 6. 20 Curva de corriente del rodillo laminador 2 (5 toneladas) tomada en el proceso

En este caso, teóricamente, se tiene un torque constante de 277.94 Nm, pero los datos de torque reales se encuentran en un valor constante promedio de 306.74 Nm cumpliendo con la respuesta de torque explicada para el caso del rodillo laminador 1 (2 toneladas). Ver Fig. 6.19.

La carga con el rodillo laminador 2 de cinco toneladas toma un valor de corriente promedio de 123.96 A que representa el 62.3% de la corriente nominal. Fig. 6.20.

#### 6.4 RESUMEN DE RESULTADOS

En la tabla 6.5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en la que se puede comparar los valores de torque y corriente que requiere el sistema para mover cada carga.

	Rodillo laminador 1 2 toneladas			Rodillo laminador 2 5 toneladas		
	Dato Calculado	Dato Medido	Diferencia entre valor medido y calculado	Dato Calculado	Dato Medido	Diferencia entre valor medido y calculado
Corriente (A)	72.29	78	5.71	119.83	123.96	4.13
Corriente (%)	36.33	39.2	2.87	60.21	62.3	2.09
Torque (Nm)	167.24	200	32.76	277.94	306.74	28.8
Torque (%)	25.04	29.94	4.9	41.61	45.91	4.3
Velocidad (rpm)	1465			1461		

Tabla 6. 5 Tabla resumen de resultados

Las pruebas realizadas fueron hechas al 60% de la capacidad de producción de la etapa de laminado, determinada por la cantidad de separadores de agua trabajando; por lo que se puede observar en la tabla resumen de resultados que el motor de inducción con la mayor capacidad de carga es decir el rodillo laminador 2 de cinco toneladas está trabajando al 62.3% de la corriente nominal con una velocidad de

1461 rpm, lo que significa que al aumentar la capacidad de la fábrica al 100% aumentará la velocidad del proceso y por ende la corriente, por lo que el sistema de accionamiento podrá trabajar sin problemas con todo su potencial.

La corriente necesaria para mover el rodillo laminador 1 de dos toneladas es 78 A. mientras que la corriente que requiere el motor para hacer girar al rodillo laminador 2 de cinco toneladas es 123,96 A; siendo la relación de masas entre los rodillos igual a 2,5 se podría esperar que la relación de corrientes necesarias para mover las diferentes cargas se parezca a la relación de masas. Este efecto no se produce, la relación real entre corrientes es igual a 1,59 y esto se debe a que el rodillo de cinco toneladas posee más inercia debido a su mayor diámetro y masa, siendo estas dos magnitudes las que determinan el momento de inercia de un cilindro.

La diferencia entre los valores medidos y calculados de corriente y torque no presentan una diferencia significativa sin embargo los valores calculados no reflejan la variación de corriente y torque que se dan en el proceso debido al incremento de carga cuando la pasta se adhiere al rodillo laminador.

# CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

- De acuerdo a los datos obtenidos en el presente proyecto de titulación se puede concluir que los valores de torque y corriente calculados usando el modelo aproximado del motor de inducción, despreciando la rama de magnetización del mismo, no difieren sustancialmente de los valores medidos, de ahí que una manera para dimensionar un variador de velocidad es a partir de cálculos teóricos de corriente y torque usando los parámetros internos del motor de inducción; estos valores calculados darán una aproximación bastante buena del comportamiento del sistema y se podría considerar además un factor que compense todas las aproximaciones usadas en los cálculos.
- La información básica y más importante para el diseño y programación de un variador de velocidad es el valor y tipo de carga con la que se va a trabajar, ya que esta proporciona los datos necesarios tanto en régimen permanente como en estados críticos de funcionamiento, donde el accionamiento debe trabajar sin que éste o el motor sufran daños que acorten su vida útil.
- Cuando un motor de inducción va a ser controlado por un variador de velocidad el aislamiento de los devanados del motor debe ser capaz de soportar los impulsos parásitos y cambios rápidos de tensión de salida del inversor, por lo que se requiere que contengan un barniz especial como estándar desde su fabricación y se debe reducir la corriente de fuga de capacitancia, las pérdidas de alta frecuencia y las corrientes de los cojinetes del motor usando filtros  $du/dt$  en el caso de que el motor con el que se va a trabajar tenga una vida útil elevada.

- De la anterior se desprende que cuando se va a instalar un variador de velocidad para un motor existente, se debe considerar la fecha de fabricación del motor pues es posible que, si es muy antiguo, no haya sido aislado contra impulsos de voltaje que se presentan con la nueva tecnología de variadores. En este caso podría a la larga ser más económico cambiar el motor por uno nuevo, que cumpla con los requerimientos de aislamiento señalados, como fue el caso del presente trabajo.
- En la actualidad los accionamientos de corriente alterna poseen características y funciones de programación muy avanzadas, por lo cual es necesario estudiar a detalle toda la información proporcionada por los fabricantes para poder utilizar esta tecnología sin la presencia de daños.
- La realización de pruebas previas a la puesta en marcha del conjunto motor – variador de velocidad como la magnetización de ID, cuando se trabaja con la tecnología de control DTC, mejoran el funcionamiento con carga ya que se genera un modelo matemático que permite conocer la posición exacta del eje del motor cuyos parámetros de control se actualizan 40.000 veces por segundo.
- La etapa de laminado de planchas mantiene la filosofía de operación del sistema anterior por pedido de ETERNIT S.A., es decir se maneja manualmente por el operador de turno, sin que esto signifique que no puede ser totalmente automatizada.
- La lógica de control del proceso de laminación de planchas de fibrocemento se la programó de forma que cumpla con los requerimientos de Eternit S.A., sin dejar de considerar aspectos técnicos como el de dar seguridad en la maniobra cuando el operador arranca o detiene al motor varias veces, a pesar de que esto sea contraindicado.

- Cuando se coloca un variador de velocidad en una red eléctrica es imprescindible usar reactancias de entrada para la mitigación de armónicos, que pueden ser perjudiciales para las demás cargas que se hallen conectadas a la red.
- Para el dimensionamiento de los cables de fuerza, el uso de filtros, interruptores, etc. es necesario realizar un recorrido por las instalaciones de la red eléctrica de la fábrica, para tener una idea más concreta de las distancias del suministro, sus protecciones y de la ubicación de los bancos de compensación del factor de potencia.
- A pesar de que la etapa de laminado de planchas para la fabricación de tejas de fibrocemento en ETERNIT S.A. sigue funcionando solamente al 60% de su capacidad total, se logró aumentar la productividad de la planta sin la necesidad aún de incrementar el número de separadores de agua instalados.
- Para el dimensionamiento de los equipos involucrados en el presente proyecto de titulación, se tuvo en cuenta un factor muy importante como es la altura de la ciudad de Quito que ocasiona una disminución de las capacidades nominales de cualquier equipo.
- De acuerdo con las consideraciones del torque de carga del motor presentadas en el capítulo seis, se puede concluir que la tecnología de control DTC con la que se está trabajando cumple con los requerimientos de carga del sistema de rodillos y con la pequeña variación de torque que existe por vuelta al laminar la pasta, es decir el variador de velocidad puede entregar las exigencias de torque de la carga sin presentarse oscilación de la velocidad de proceso.
- A través de los datos adquiridos de las principales variables de proceso como torque, corriente, voltaje, velocidad, etc. se puede asegurar el correcto

funcionamiento del sistema de accionamiento con todo su potencial aún cuando la planta trabaje al 100% de su capacidad, entonces se puede decir que el dimensionamiento del mismo fue el adecuado.

- Con la ayuda de una red de campo industrial se puede adquirir y controlar los procesos desde un HMI como el presentado para este proyecto de titulación. Todas las variables del proceso pueden ser tomadas y a través de un bus de campo entregar toda esta información al sistema supervisor.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

- Para la adquisición de datos desde el variador de velocidad hacia el HMI se utilizó el protocolo de comunicación Modbus RTU, el mismo que por su simplicidad de operación y alta disponibilidad en casi todos los controladores actuales, hace factible la integración de datos de todo un proceso bajo una misma aplicación, por lo que se recomienda el uso de este protocolo cuando se desarrolle un sistema para adquisición de datos.
- Actualmente el sistema de rodillos está siendo operado manualmente en un lazo abierto de control. El variador de velocidad tiene la capacidad de ejecutar un lazo cerrado de control para la etapa de laminado, en el que la variable de realimentación sería el espesor medido y acondicionado de cada plancha de fibrocemento; esta medición se la podría introducir al equipo por medio de una entrada analógica de la tarjeta de control y usando un algoritmo interno se podría implementar un control más adecuado.
- Sería recomendable que el nuevo sistema de control para la dosificación de materiales y preparación de la pasta disponga de una serie de recetas dependiendo de la línea de producción y que esta información sea llevada hasta el variador de velocidad, el mismo que ajustaría su comportamiento para



satisfacer los requerimientos del producto para que este pase a la siguiente etapa del proceso.

- Para el presente proyecto de titulación se desarrolló una HMI centrada en la etapa de laminación de planchas de fibrocemento usando el software Wonderware Intouch en su versión demo. Debido al interés mostrado por Eternit S.A. en el desarrollo de un sistema de monitoreo y control que centralice todo el proceso se recomienda el uso de un programa con características similares al utilizado y con la posibilidad de adquirir y enviar datos usando un protocolo o bus de campo.
- Para el correcto cumplimiento de las funciones del variador de velocidad, se recomienda realizar mantenimiento preventivo de la unidad como: el cambio periódico de los filtros de aire para mantener la temperatura de refrigeración especificada, limpieza del polvo presente en el ambiente circundante al variador de velocidad que puede generar cortocircuitos en las tarjetas de control por electricidad estática; verificación de los parámetros de visualización de la temperatura de las tarjetas; los semiconductores, etc.
- Se recomienda cumplir con las indicaciones de seguridad especificadas por el fabricante para su funcionamiento normal y mantenimiento ya que de no respetarse pueden producirse lesiones físicas o daños en el equipo.
- Los procesos de dosificación y laminado trabajan con sistemas de control independientes, pero se recomienda que sus lazos de control se realimenten con las variables medidas en la etapa donde se está utilizando la pasta y no donde se la dosifica.
- Cuando se requiera automatizar un proceso con un variador de velocidad la característica principal para el dimensionamiento del mismo es el conocimiento del torque de carga en todas las condiciones de funcionamiento

tales como: arranque, trabajo al 100% de carga y sobrecargas en períodos cortos; ya que esto influye de manera importante en la capacidad de corriente que pueda entregar el accionamiento al motor de inducción al presentarse dichas condiciones sin que los mismos sufran daños.

- Durante el desarrollo del presente proyecto de titulación se automatizó la etapa de moldeado de planchas de fibrocemento en Eternit S.A. y actualmente se está por cambiar la etapa de dosificación de la planta por lo que no cabe recomendaciones a cerca de modernizaciones o automatizaciones para estas etapas del proceso.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- ABB; Catálogo SACE – interruptores automáticos de caja moldeada Tmax; Italia. 2006
- ABB; Catálogo técnico; Convertidores de frecuencia industriales ACS800; Finlandia. 2007
- ABB; Firmware and hardware manual ACS800-02; Finlandia 2007
- ABB; Catálogo técnico; Process performance induction motors; Finlandia. 2006
- ABB; Manual de instrucciones Commander C150; Reino Unido 2006
- ABB; Libro de guías técnicas de accionamiento de CA; Finlandia. 2001
- AVILES, Fausto; Curso de Instalaciones de Bajo de Voltaje; EPN; Quito.
- RIVERA, Pablo; Control de máquinas eléctricas; EPN; Quito 2005.

## **INTERNET**

- ETERNIT S.A.      <http://www.eternit.com.ec>
- ABB                      <http://www.abb.com>

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

#### CAPÍTULO 1

Figura 1. 1 Cubiertas de fibrocemento	3
Figura 1. 2 Pulper y tanque dosificador de agua	4
Figura 1. 3 Fibra de cartón	5
Figura 1. 4 Crisotilo al ingreso del molino	6
Figura 1. 5 Silos de cemento	7
Figura 1. 6 Pasta final de fibrocemento	8
Figura 1. 7 Motores de agitadores de los tanques separadores	9
Figura 1. 8 Banda de Fieltro	10
Figura 1. 9 Rodillos laminadores utilizados	11
Figura 1. 10 Rodillo laminador, caja reductora y motor de inducción	12
Figura 1. 11 Cuchillas de corte lateral	13
Figura 1. 12 Tanque de material sobrante de las planchas	13
Figura 1. 13 Máquina moldeadora de planchas	14
Figura 1. 14 Ingreso de coches al horno	15
Figura 1. 15 Desmolde de planchas	16
Figura 1. 16 Producto al aire libre	16
Figura 1. 17 Etapa de mezcla	17
Figura 1. 18 Etapa de laminado	18

#### CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 Antiguo sistema de fuerza	20
Figura 2. 2 Nuevo sistema de fuerza	22
Figura 2. 3 Protección del nuevo circuito de fuerza	23
Figura 2. 4 Relé electrónico PR221DS-LS/I	23
Figura 2. 5 Variador de velocidad ABB	25
Figura 2. 6 Nuevo motor de inducción ABB	26
Figura 2. 7 Nuevo motor y caja reductora	27
Figura 2. 8 Panel para programación del variador de velocidad	29
Figura 2. 9 Tarjeta de control RMIO	30

Figura 2. 10 Panel de control junto al proceso	31
--	----

#### CAPÍTULO 4

Figura 4. 1 Diagrama de funcionamiento de la HMI	52
Figura 4. 2 Pantalla "PRESENTACION"	53
Figura 4. 3 Ventana "REGISTRO DE USUARIOS"	54
Figura 4. 4 Botón "CONFIGURAR USUARIOS"	55
Figura 4. 5 Botón "CAMBIAR CONTRASEÑA"	56
Figura 4. 6 Ventana de "PROCESO"	57
Figura 4. 7 Ventana de "LAMINADO"	58
Figura 4. 8 Ventana "GRAFICAS DE PROCESO"	59
Figura 4. 9 Ventana "HISTORICOS DE PROCESO"	60
Figura 4. 10 Ventana "ALARMAS DE PROCESO"	61
Figura 4. 11 Ventana del programa Modicon MODBUS	66
Figura 4. 12 Ventana de configuración del puerto de comunicaciones	67
Figura 4. 13 Ventana de configuración del Topic	68
Figura 4. 14 Confirmación de eliminación de un Topic	68
Figura 4. 15 Ventana de definición del Topic	69
Figura 4. 16 Ventana de configuración del servidor de datos.	70
Figura 4. 17 Ventana de configuración del Access Name	71
Figura 4. 18 Ventana del Tag Name "Frecuencia"	72

#### CAPÍTULO 5

Figura 5. 1 Montaje de los equipos dentro del armario de fuerza	75
Figura 5. 2 Variador de velocidad ACS800-02-0210-5	76
Figura 5. 3 Inclinación peligrosa del variador de velocidad.	77
Figura 5. 4 Extractores en la parte superior del armario	78
Figura 5. 5 Ventiladores en la parte inferior del armario	78
Figura 5. 6 Montaje del pedestal del variador de velocidad	79
Figura 5. 7 Pedestal para el cableado de fuerza y control hacia el variador de velocidad	80
Figura 5. 8 Diagrama de conexión de los cables de potencia	81
Figura 5. 9 Armario del variador de velocidad sin pedestal	82
Figura 5. 10 Recorrido de cables de control y potencia	84
Figura 5. 11 Luces piloto de señalización del estado del interruptor	85
Figura 5. 12 Instalación de accesorios dentro del interruptor.	85

Figura 5. 13 Tablero de control de operación del sistema de rodillos	87
Figura 5. 14 Calibración de protecciones del interruptor automático	88

## CAPÍTULO 6

Figura 6. 1 Curva de par/velocidad típica de un motor de inducción.	93
Figura 6. 2 Curvas de par/velocidad de un motor de inducción alimentado por un convertidor de frecuencia.	93
Figura 6. 3 Par máximo, tensión y flujo en función de la velocidad relativa.	94
Figura 6. 4 Curva de carga de torque constante.	96
Figura 6. 5 Curva de carga de torque cuadrático.	96
Figura 6. 6 Curva de carga de potencia constante.	97
Figura 6. 7 Curva de carga de potencia y torque constante.	97
Figura 6. 8 Lazo de control de un accionamiento de CA con control de frecuencia con PWM	99
Figura 6. 9 Lazo de control de un accionamiento de CA con control del vector de flujo con PWM	100
Figura 6. 10 Lazo de control de un accionamiento de CA con DTC	101
Figura 6. 11 Curva Torque vs. Velocidad rodillo laminador 1 (2 toneladas)	104
Figura 6. 12 Curva de corriente de arranque rodillo laminador 1 (2 toneladas)	104
Figura 6. 13 Curva Torque vs. Velocidad rodillo laminador 2 (5 toneladas)	105
Figura 6. 14 Curva Corriente de arranque rodillo laminador 2 (5 toneladas)	106
Figura 6. 15 Curva torque de carga rodillo laminador 1 (2 toneladas) con los datos teóricos calculados	108
Figura 6. 16 Curva de torque de carga rodillo laminador 1 (2 toneladas) tomada en el proceso	109
Figura 6. 17 Corriente de entrada en los terminales del motor de inducción	110
Figura 6. 18 Curva torque de carga rodillo laminador 1 (2 toneladas) con los datos teóricos calculados	112
Figura 6. 19 Curva de torque de carga rodillo laminador 2 (5 toneladas) tomada en el proceso	113
Figura 6. 20 Curva de corriente del rodillo laminador 2 (5 toneladas) tomada en el proceso	113

## TABLAS

### CAPÍTULO 4

Tabla 4. 1 Nombres, contraseña y nivel de acceso de los usuarios	55
Tabla 4. 2 Códigos de Función primarios de Modbus	65

## CAPÍTULO 6

Tabla 6. 1 Datos de placa del motor de inducción	102
Tabla 6. 2 Características de los rodillos laminadores	103
Tabla 6. 3 Variables del proceso y datos del modelo matemático del motor	107
Tabla 6. 4 Variables del proceso y datos del modelo matemático del motor	111
Tabla 6. 5 Tabla resumen de resultados	114
Tabla 6. 6 Comparación de resultados medidos y calculados Rodillo laminado 1 – dos toneladas	115
Tabla 6. 7 Comparación de resultados medidos y calculados Rodillo laminado 2 – cinco toneladas	115