



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA  
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN  
DEL TÍTULO DE INGENIERÍA**

**AUTOR: CHRISTIAN XAVIER GONZÁLEZ ZURITA**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE  
CONTROL PARA LA BOBINADORA CORTADORA REBOGRAF  
LITE 1200 PROPIEDAD DE LA EMPRESA BOPP DEL ECUADOR**

**DIRECTOR: ING. ALEXANDER, IBARRA**

**CODIRECTOR: ING. HUGO, ORTIZ**

**SANGOLQUÍ, NOVIEMBRE 2013**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**CERTIFICADO**

Ing. Alexander Ibarra

Ing. Hugo Ortiz

**CERTIFICAN**

Que el trabajo titulado “Diseño e implementación de un sistema de control para la bobinadora-cortadora Rebograf lite 1200 propiedad de la empresa Bopp del Ecuador”, realizado por Christian Xavier González Zurita, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple con las normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. El mencionado trabajo consta de un documento empastado, un disco compacto, el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Se realiza la entrega de los documentos al Ing. Luis Orozco en su calidad de Coordinador de Carrera.

---

Ing. Alexander Ibarra

DIRECTOR

---

Ing. Hugo Ortiz

CO-DIRECTOR

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE****INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL****DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

CHRISTIAN XAVIER GONZALEZ ZURITA

**DECLARAN QUE:**

El proyecto de grado denominado “Diseño e implementación de un sistema de control para la bobinadora-cortadora Rebograf lite 1200 propiedad de la empresa Bopp del Ecuador”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 01 de Noviembre de 2013

---

Christian Xavier González Zurita

171638966-1

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y**

**CONTROL**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, Christian Xavier González Zurita

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del trabajo “Diseño e implementación de un sistema de control para la bobinadora-cortadora Rebograf lite 1200 propiedad de la empresa Bopp del Ecuador”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 01 de Noviembre de 2013

---

Christian Xavier González Zurita

171638966-1

## DEDICATORIA

### *A Mi hija Valentina.*

*Por ser la fuerza que me impulsa a seguir creciendo cada día, espero poder ser el mejor padre del mundo para ti y darte todo lo que necesites, te amo mi pequeñita, este es el primer paso para construir algo mejor para nuestra familia.*

### *A mis padres.*

*Por confiar ciegamente en mi y por brindarme siempre su amor y comprensión incondicionalmente, gracias por hacer de mi la persona que soy con la educación y valores que me has enseñado sin ustedes no estaría aquí.*

## AGRADECIMIENTO

*A mi querida hermana, por su ayuda incondicional para conmigo y con mi hija, espero que tus sueños se cumplan como lo hacen ahora los míos.*

*A mi gran amigo Rommel, gracias por tu ayuda siempre has estado en los momentos malos y buenos desde que te conozco eres una amistad invaluable.*

*A mis amigos y compañeros de clase William Q, Vanesa U., Andrés Montoya compartimos tantas horas en esta universidad que por varios años fue nuestro segundo hogar, hoy nuestros sueños se están haciendo realidad.*

*Al Ing. Víctor Proaño, un excelente profesional, que aparte de su enseñanza me ha mostrado la gran calidad de persona que es, le agradezco de todo corazón ya que sin su apoyo en momentos difíciles de mi vida no hubiera logrado conseguir este logro.*

*Al Ing. Alexander Ibarra que me ha guiado de forma acertada en el presente proyecto y durante los momentos en que tuve la oportunidad de ser su estudiante.*

*Christian Xavier González Zurita*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b><u>CAPÍTULO 1.....</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>PRELIMINARES .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
1.3. ALCANCE DEL PROYECTO.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1. OBJETIVO GENERAL .....	5
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b><u>CAPÍTULO 2.....</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>MARCO TEÓRICO .....</u></b>	<b><u>7</u></b>
<b><u>2.1 PROCESO DE REBOBINADO - CORTE.....</u></b>	<b><u>7</u></b>
2.2 MOTORES AC Y CONVERTIDORES DE FRECUENCIA .....	9
2.2.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	9
2.2.2 POTENCIA .....	10
2.2.3 MOTORES ELÉCTRICOS .....	12
2.2.4 MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO .....	13
2.2.5 CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO .....	15

2.2.6	DESCRIPCIÓN DE TÉCNICAS PARA CONTROL DE VELOCIDAD .....	16
2.6	VARIADORES DE FRECUENCIA.....	17
2.6.1	RECTIFICADOR .....	17
2.6.2	CIRCUITO INTERMEDIO.....	18
2.6.3	ONDULADOR .....	18
2.7	DIMENSIONAMIENTO DE VARIADORES DE FRECUENCIA.....	19
2.7.1	PUNTOS CLAVE PARA LA SELECCION .....	19
2.7.2	TORQUE CONSTANTE.....	20
2.7.3	TORQUE PROPORCIONAL.....	20
2.7.4	TORQUE CUADRATICO O VARIABLE .....	21
2.7.5	POTENCIA CONSTANTE (TORQUE INVERSO) .....	22
2.8	RESUMEN CONSIDERACIONES GENERALES DE SELECCIÓN.....	23
2.10	MOTORREDUCTORES.....	24
2.10	SENSORES INDUCTIVOS .....	25
2.11.1	CONCEPTOS TEÓRICOS.....	26
2.11.2	ESTADOS DE UN SENSOR INDUCTIVO .....	27
2.11.3	RANGO DE DETECCIÓN .....	28
2.11.4	HISTÉRESIS.....	29
2.11.5	TERMINOLOGÍA.....	30
2.12.	SENSORES FOTOELÉCTRICOS .....	30
2.12.1.	MODOS DE DETECCIÓN .....	31
<b><u>CAPÍTULO 3.....</u></b>		<b>35</b>

<b><u>DESARROLLO DEL HARDWARE Y SOFTWARE .....</u></b>	<b><u>35</u></b>
<b>3.1 HARDWARE DE FÁBRICA .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.2 DESCRIPCIÓN Y READECUACIÓN DEL CONJUNTO ELECTROMECAÍNICO DE LA MÁQUINA.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ORIGINAL.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.1 ANÁLISIS DEL MODO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA ORIGINAL.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ORIGINAL .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3 DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA.....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.1 LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE CONTROL..</b>	<b>51</b>
<b>3.3.2 DISEÑO DE LA NUEVA ARQUITECTURA DEL SISTEMA .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.3 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.....</b>	<b>55</b>
<b>3.4 CONTROLADORES LÓGICOS COMERCIALES .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR .....</b>	<b>58</b>
<b>3.5 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE PROTECCIONES PARA LOS EQUIPOS EXISTENTES EN EL TABLERO DE CONTROL .....</b>	<b>61</b>
<b>3.6 DISEÑO DEL TABLERO DE FUERZA.....</b>	<b>65</b>
<b>3.6.1. DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>3.6.2. DISTRIBUCIÓN DEL TABLERO .....</b>	<b>68</b>
<b>3.7 DESARROLLO DEL SOFTWARE.....</b>	<b>71</b>

<b>3.7.1 FUNDAMENTOS PARA CREAR EL ALGORITMO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE LA MÁQUINA.....</b>	<b>71</b>
<b>3.7.2 CÁLCULO DEL SETPOINT DE VELOCIDAD DEL REBOBINADOR.....</b>	<b>72</b>
<b>3.7.3 FUNDAMENTO LÓGICO PARA EL ALINEADOR DE MATERIAL.....</b>	<b>77</b>
<b>3.8 INTERFAZ DE OPERACIÓN.....</b>	<b>79</b>
<b>3.8.1 PANTALLA SUPERVISIÓN.....</b>	<b>80</b>
<b>3.8.2 PANTALLA DE CALIBRACIÓN Y CARGA.....</b>	<b>81</b>
<b>3.8.3 PANTALLA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....</b>	<b>82</b>
<b>3.8.4 PROGRAMACIÓN DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA.....</b>	<b>83</b>
<b><u>CAPÍTULO 4.....</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b><u>PRUEBAS Y RESULTADOS.....</u></b>	<b><u>87</u></b>
<b>4.1 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL DE LOS VARIADORES.....</b>	<b>87</b>
<b>4.2 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD.....</b>	<b>89</b>
<b>4.4 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PANEL TÁCTIL.....</b>	<b>92</b>
<b>4.5 PRUEBAS Y RESULTADOS DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD.....</b>	<b>96</b>
<b>4.6 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE ALINEACIÓN.....</b>	<b>98</b>
<b><u>CAPÍTULO 5.....</u></b>	<b><u>100</u></b>
<b><u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u></b>	<b><u>100</u></b>
<b>5.1. CONCLUSIONES.....</b>	<b>100</b>

**5.2. RECOMENDACIONES ..... 101**

**ANEXO 1..... 105**

**PLANO ELECTRICOS REBOGRAF LITE 1200 ..... 105**

**ANEXO 2..... 106**

**MANUAL DE USUARIO..... 106**

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Cuerpo de alineamiento .....	9
Figura 2. 3 Motor trifásico - taller Bopp del Ecuador .....	10
Figura 2. 4 Flujo de Potencia de un motor .....	12
Figura 2. 5 Obtención de un campo magnético .....	14
Figura 2. 8 Rectificador .....	17
Figura 2. 9 Ondulador.....	18
Figura 2. 10 Curva aplicación Par constante.....	20
Figura 2. 11 Curva aplicación Par proporcional .....	21
Figura 2. 12 Curva aplicación par variable.....	22
Figura 2. 13 Curva aplicación Potencia constante .....	23
Figura 2. 17 Esquema construcción de un sensor inductivo.....	25
Figura 2. 18 Campo magnético asociado.....	26
Figura 2. 19 Campo magnético en un sensor inductivo.....	27
Figura 2. 20 Estados de los componentes de un sensor inductivo.....	28
Figura 2. 21 Histéresis de un sensor inductivo .....	30
Figura 2. 24 Modo directo.....	32
Figura 2. 25 Modo reflexivo .....	33
Figura 2. 26 Modo difuso .....	33
Figura3. 1 Módulos de control brasileños - Rebograf Lite 1200.....	36
Figura3. 2 Cuerpo de rebobinado antiguo .....	38

Figura3. 3	Cuerpo de rebobinado - corte readecuado.....	39
Figura3. 4	Sistema de alineación antiguo .....	40
Figura3. 5	Cuerpo de desbobinado readecuado.....	41
Figura3. 6	Módulo control Contagraf.....	43
Figura3. 7	Esquema eléctrico de control y fuerza variador M01 desbobinador .....	45
Figura3. 8	Lazo de control de velocidad del desbobinador.....	46
Figura3. 9	Esquema eléctrico del lazo de control de velocidad rebobinadores .....	47
Figura3. 10	Lazo de control de velocidad rebobinadores.....	48
Figura3. 11	Conjunto mecánico para el conteo de vueltas del rodillo desbobinador ....	49
Figura3. 12	Elementos de maniobra y control.....	49
Figura3. 13	Arquitectura del nuevo sistema de control.....	55
Figura3. 14	Panel View Component C600.....	59
Figura3. 15	Paquete Siemens S7-1200 KTP600 y software de programación.....	60
Figura3. 16	Esquema de distribución de elementos de control.....	63
Figura3. 17	Bornera wago con sistema cage clamp .....	63
Figura3. 18	Terminales tipo pin .....	64
Figura3. 19	Tablero de control del nuevo sistema.....	64
Figura3. 20	Instrucciones de montaje variadores WEG .....	68
Figura3. 21	Esquema de montaje del tablero de fuerza.....	69
Figura3. 22	Tablero de Fuerza del nuevo sistema .....	70
Figura3. 23	Tablero de Motores readecuado .....	70
Figura3. 24	Esquema de funcionamiento del proceso de rebobinado .....	71
Figura3. 25	Esquema funcionamiento del rebobinador .....	72
Figura3. 26	Radio interno y externo rebobinador en t diferente de 0 .....	74

Figura3. 27 Diagrama de flujo proceso de rebobinado .....	76
Figura3. 28 Esquema sistema de alineamiento .....	78
Figura3. 29 Secciones de la pantalla de supervisión .....	80
Figura3. 30 Pantalla de supervisión con problemas de mantenimiento .....	81
Figura3. 31 Pantalla de calibración y carga.....	82
Figura3. 32 Pantalla de mantenimiento preventivo .....	83
Figura3. 33 Display mostrando un parámetro .....	85
Figura3. 34 Display del convertidor WEG CFW-08 .....	85
Figura4. 1 Tacómetro digital de rueda existente en planta. ....	89
Figura4. 2 Velocidades medidas en los rebobinadores .....	92
Figura 4. 3 Banner de Alarmas mostrando estado pérdida de conectividad.....	93
Figura4. 4 Resultado prueba de falla de variadores de velocidad .....	94
Figura4. 5 Resultado prueba de falla del sistema de alineación .....	95
Figura4. 6 Resultado prueba de mantenimiento preventivo no realizado.....	96
Figura4. 7 Variadores de velocidad en estado normal de funcionamiento.....	98
Figura4. 8 Sensores fotoeléctricos A y B del sistema de alineamiento.....	99
Figura4. 9 Acercamiento material alineado correctamente .....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Pérdidas comunes eléctricas, magnéticas y mecánicas.....	12
Tabla 3. 1 Detalle entradas necesarias .....	56
Tabla 3. 2 Detalle salidas necesarias. ....	56
Tabla 3. 3 Comparativa controladores comerciales Allen Bradley-Siemens.....	57
Tabla 3. 4 Listado de equipos .....	66
Tabla 3. 5 Sumatoria de corrientes .....	66
Tabla 3. 6 Equipos necesarios para la implementación del sistema .....	67
Tabla 3. 7 Posibles combinaciones de detección sensores fotoeléctricos .....	78
Tabla 3. 8 Parámetros funcionamiento Variadores WEG CFW-08.....	86
Tabla 4. 1 Resultados pruebas del sistema electrónico .....	88
Tabla 4. 2 Resultados pruebas del sistema de control de velocidad.....	91

## **RESUMEN**

El presente proyecto muestra el diseño e implementación de un sistema de control de velocidad de una máquina rebobinadora, para cumplir con el objetivo se utilizaron equipos como variadores de frecuencia, sensores fotoeléctricos, Disyuntores, Contactores, sistemas de seguridad y un PLC. El programa de control fue desarrollado e implantado en hardware y software SIEMENS. EL sistema también cuenta con un sistema de supervisión, mediante el cual se ingresan los parámetros de la máquina, el panel además muestra estados de alarma y emite una señal audible para alertar al operador de un mal funcionamiento. Se ha creado una estructura de control basada en comunicaciones Ethernet Industrial con el fin de facilitar las tareas de programación y conexión de los equipos. Se describe además el proceso de readecuación que sufre la máquina durante el proceso de creación, cableado y montaje del nuevo tablero y equipos.

## **CAPÍTULO 1**

### **PRELIMINARES**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

Bopp del Ecuador Cía. Ltda. es una empresa especializada en la elaboración de empaques flexibles y/o metalizados en base al material polipropileno bi orientado conocido por sus siglas como BOPP, que se obtiene a partir del gas de los procesos de cracking del petróleo.

La compañía inicia sus operaciones en el año 1992, con una capacidad de 3000 toneladas anuales. Además se realizan las primeras exportaciones a los mercados contiguos de Colombia y Perú. En 1995 se mejoran los equipos existentes y unen a las líneas de producción máquinas para crear productos metalizados, con la puesta en marcha de la metalizadora al alto vacío con una capacidad cercana a las 1500 toneladas

anuales. La empresa posee dos naves de producción principales, estas son las encargadas de los procesos de extrusión, estiramiento en dirección de máquina, estiramiento horizontal y bobinado del material en el rollo madre.

La película obtenida después del proceso debe poseer propiedades específicas determinadas por el cliente: espesor, consistencia, metalizado, perlado; por lo cual se requiere un proceso de post-tratamiento del material extruido y estirado, para este fin se utilizan equipos generadores de rayos ultravioletas con el objetivo de lograr micro porosidades en el material que permitan el metalizado, impresión o laminado del producto. Finalmente el material tratado se enrolla en un core metálico de aproximadamente 6 metros de longitud y 10cm de radio.

El producto no se entrega en este estado ya que es de difícil manipulación debido a su gran peso, la suma del peso del material más la del core metálico puede alcanzar fácilmente las dos toneladas. Por este motivo es necesario cortar el material y rebobinarlo en cores de cartón livianos, este último paso es realizado por un grupo de 4 máquinas rebobinadoras y se desea añadir una más a este proceso, la rebobinadora Rebograf Lite 1200 que actualmente se encuentra sin funcionar.

Para llevar a cabo el procedimiento antes mencionado se utiliza maquinaria especializada, es decir de un fabricante específico que en la mayoría de casos se ubica en el extranjero lo que hace que el mantenimiento correctivo o preventivo de la máquina sea demasiado costoso y además representa pérdida de dinero y tiempo para la empresa, la cual debe constantemente producir.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Este proyecto es sumamente importante para la empresa ya que permitirá la recuperación de material en observación o defectuoso, que se produce en la fase final del proceso de fabricación, anualmente se pierden miles de dólares en el proceso de reciclaje de la película de polipropileno. La empresa cuenta con cuatro máquinas rebobinadoras que se encuentran a tope de producción la mayoría del tiempo, lo cual hace imposible utilizar las existentes para recuperación de material. Para este fin la empresa requiere de una máquina dedicada a realizar este procedimiento.

Bopp del Ecuador posee una rebobinadora-cortadora de origen Brasileño la cual ha dejado de recibir soporte de su fabricante y en estos momentos se encuentra inactiva debido a la falta de repuestos de sus módulos electrónicos, la planta actualmente se decanta por la posibilidad de construir un sistema actualizado, económico y funcional que se adapte al equipo en cuestión de tal manera que la compañía pueda migrar sus equipos sin depender de marcas específicas o fabricantes extranjeros.

Un punto importante a considerar es la facilidad de operación de la máquina, para ello el sistema será dotado de una interfase amigable, en la que se visualizarán los parámetros más relevantes en tiempo real. Con esto lograremos eficiencia en el trabajador y también se necesitará menos personal para operar el equipo.

---

### 1.3. ALCANCE DEL PROYECTO

Al culminar el proyecto la bobinadora contará con un sistema de medición de diámetro y metraje por medio de un sensor industrial inductivo el cual medirá la presencia de una pieza metálica acoplada al eje del rodillo de presión del rodillo desbobinador de la máquina. El sensor medirá la presencia y cercanía de la pieza metálica diseñada especialmente para este propósito, el valor proporcionado será acondicionado para su posterior lectura y análisis en un PLC.

Con los datos del sensor ya procesados se continuará con la regulación de velocidad y tensión. Para cumplir con este objetivo se utilizarán variadores de velocidad. Estos variadores serán controlados remotamente mediante el PLC. La señal enviada desde el PLC será proporcional al espesor del material, diámetro de la bobina en cuestión y según la velocidad de trabajo ingresada para la máquina que se medirá en pies/min. Además tendrá un sistema de monitoreo y operación mediante un panel táctil de marca Siemens Touchpanel serie TK 400 mono, el cual permitirá al operador monitorear las principales variables del proceso, así como el ingreso por parte del operador del tipo de película, espesor y longitud aproximada requerida. El sistema estará en la capacidad de mostrar estados de alarma. De ser este el caso se indicará la falla pertinente en la interfaz y también mediante una señal audible.

El material a ser cortado debe estar alineado, para este fin se implantará un sistema de posicionamiento del material mediante sensores ópticos en conjunto con un motor reductor alineador. El sistema a ser implantado debe estar en la capacidad de controlar correctamente la tensión de rebobinado, alineación del material, y velocidad en los

motores ya que esto marca la calidad del producto a ser vendido, ofreciendo a la empresa la capacidad de ahorrar tiempo, dinero y personal en el proceso de reciclaje del producto.

Para el uso del personal de mantenimiento se implantará en el PLC una subrutina de mantenimiento preventivo de la máquina, de tal forma que se realicen chequeos periódicos al sistema, evitando posibles daños a los motores, elementos del sistema de control o fuerza.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un sistema de control para la bobinadora REBOGRAF LITE 1200 para la empresa Bopp del Ecuador Cía. Ltda.

### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar todos los circuitos de fuerza y de control necesarios para permitir el manejo de velocidad de los motores de la máquina mediante variadores de frecuencia.
- Diseñar un sistema de medición que permita determinar el diámetro y metraje de la bobina a producirse.
- Implementar un sistema de alineación del material para el motor desbobinador mediante el uso de sensores fotoeléctricos, y un motor reductor.

- Desarrollar e Implementar el programa de control de la máquina que se adapte a las necesidades de producción de la planta en un PLC.

- Crear una interfaz de usuario táctil para el control y monitoreo de los parámetros y del proceso.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 PROCESO DE REBOBINADO - CORTE**

El proceso de desbobinar y/o rebobinar es un paso esencial y necesario en la industria del polipropileno bi orientado, no solamente por su importancia durante la producción, sino también por el costo que implica la adquisición de estos sistemas, su mantenimiento y cualquier modificación que a éstos se les efectúe.

El proceso consta de cuatro etapas luego de recibir la bobina madre a cortar:

1. Montaje de la bobina en el desbobinador

2. Calibración del alineador de material
3. Posicionamiento de las cuchillas de corte
4. Rebobinado en dos rollos: superior e inferior.

El rebobinado-corte del producto es el último paso de la cadena de producción de películas de polipropileno bi orientado, mas no significa que es el paso menos importante, al contrario este último paso es el más importante para comercializar el producto ya que sus resultados depende la aceptación del producto por parte del cliente, el producto no debe poseer defectos comunes que se producen luego del proceso de rebobinado. Los defectos comunes son los producidos por error humano y otros producidos por fallas en la calibración y configuración de los equipos de las máquinas rebobinadoras.

En una máquina rebobinadora - cortadora, todos los rodillos involucrados en el proceso deberán moverse a la misma velocidad lineal, si esto no ocurre se producirán defectos en el producto final, además, el material deberá ser colocado de una manera específica denotando un recorrido único por los rodillos, este proceso es clave para evitar defectos como arrugas u orillas caídas en la bobina final. En la figura 2.1 se puede observar el cuerpo de alineamiento original de fabrica de la máquina Rebograf Lite 1200, se observa además en la esquina inferior derecha el producto final recalando su cara externa que no posee defectos de fabrica y se asemeja a la vista superior de un disco compacto.



**Figura 2. 1** Cuerpo de alineamiento

## **2.2 MOTORES AC Y CONVERTIDORES DE FRECUENCIA**

### **2.2.1 MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

Las máquinas eléctricas transforman la energía mecánica en eléctrica o viceversa, mediante el acoplamiento inductivo de dos circuitos eléctricos a través de un campo magnético.

Según el tipo de conversión de energía que realizan se clasifican en:

- Transformadores: transforman energía eléctrica en energía eléctrica
- Motores: transforman energía mecánica en energía eléctrica.
- Generadores: transforman energía mecánica en eléctrica

Los motores y generadores se denominan máquinas eléctricas rotativas, pues constan de una parte fija (estator) y una parte móvil (rotor) a la cual se acopla el eje de rotación. Además, puesto que el acoplamiento entre las partes se produce a través del campo

magnético, siempre hay una parte de la máquina en la que se produce un campo a través de la alimentación eléctrica (inductor) y otra en la que se utiliza ese campo para producir el efecto deseado (inducido). Existen diferentes tipos de máquinas rotativas según el tipo de tensión eléctrica aplicada y obtenida y por el principio de funcionamiento.

- Máquina de CC (CC en estator y rotor)
- Máquinas sincrónicas (CC en rotor y CA trifásica en estator)
- Máquinas asincrónicas (CA polifásica en rotor y estator)
- Máquinas monofásicas (CA monofásica en estator y variable en rotor).

Se puede observar un motor con carcasa anti explosiones y ventilación forzada, en proceso de mantenimiento, en la figura 2.3 a continuación.



**Figura 2. 2 Motor trifásico - taller Bopp del Ecuador**

### **2.2.2 POTENCIA**

En una máquina eléctrica siempre hay dos tipos de potencia involucradas: eléctrica y mecánica.

La potencia eléctrica (*Pelec*) se expresa como:

$$P_{elec} = V.I.\cos\varphi \quad (\text{Para circuitos monofásicos}) \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

$$P_{elec} = \sqrt{3}.VL.IL.\cos\varphi \quad (\text{Para circuitos trifásicos}) \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Esta se mide en watt [w] o kilowatt [kw]. La potencia mecánica ( $P_{mec}$ ) depende del par y la velocidad y suele expresarse para el caso de un eje giratorio, de la siguiente forma:

$$P_{mec} = T \times \omega \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Donde:

$T$ : es el par mecánico en el eje, que se mide en N.m (Newton . metro)

$\omega$ : es la velocidad angular en radianes por segundo.

De acuerdo a esta fórmula la  $P_{mec}$  resulta en watt. Sin embargo, es frecuente en la práctica encontrar otras unidades, tales como HP (Horse Power) o CV (Caballo Vapor) donde: 1 HP = 746 W y 1 CV = 735 W. Es común que para el caso de motores la selección se haga en estas unidades. Es frecuente expresar la velocidad en r.p.m. (revoluciones por minuto) en cuyo caso se la denomina con la letra  $n$ : La relación entre la velocidad en radianes y la velocidad en r.p.m. está dada por la fórmula:

$$\omega = n \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (\text{Ecuación 2.4})$$

Donde:  $n$  es el numero de vueltas que ha dado el cuerpo.

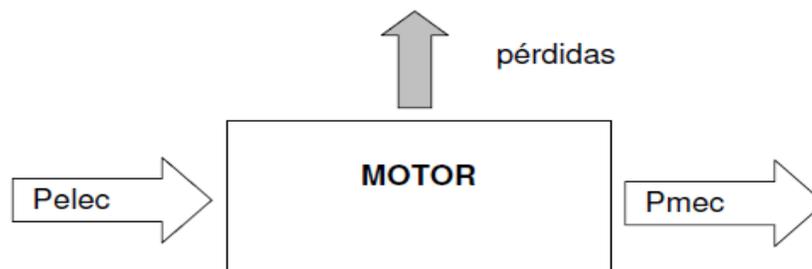
Cabe recalcar que en toda máquina eléctrica existen pérdidas de distinto tipo entre ellas tenemos:

**Tabla 2. 1** Pérdidas comunes eléctricas, magnéticas y mecánicas

TIPO	PERDIDA	DESCRIPCION
<b>Eléctricas</b>	Efecto joule	Bobinados
<b>Magnéticas</b>	Corrientes	Nucleo Magnético
	Parásitas	Materiales magnéticos no laminados
<b>Mecánicas</b>	Fricción	Acoplamientos mecánicos

### 2.2.3 MOTORES ELÉCTRICOS

Un motor tiene como función suministrar energía de rotación (en forma de par mecánico) a una carga mecánica que debe moverse. Para poder generar el par, el motor debe ser alimentado desde la red de energía eléctrica:



**Figura 2. 3** Flujo de Potencia de un motor (Mazzeo & Bertolotti, 2009)

En este caso el rendimiento resulta:

rendimiento= (energía aprovechada/ energía utilizada)

$$n = \frac{P_{mec}}{P_{elec}}$$

(Ecuación 2.5)

Donde:

$P_{mec}$  = Potencia mecánica

$P_{elec}$  = Potencia eléctrica

#### 2.2.4 MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

El motor asincrónico trifásico consta de un estator bobinado de dos o más polos por fase y de un rotor constituido por chapas de hierro silicio, que puede tener un bobinado (rotor bobinado) o puede tener barras longitudinales unidas entre sí (jaula de ardilla). En este último caso el motor tiene el rotor en cortocircuito.

Cuando se conectan a una red trifásica balanceada (de frecuencia  $f_1$ ) tres bobinas desplazadas  $120^\circ$  mecánicas entre sí (distribuidas en el estator), se genera un campo magnético ( $B_e$ ) de amplitud constante pero que gira a una velocidad  $n_s$  denominada de sincronismo .

El valor de la velocidad sincrónica es:

$$n_s = 60 \cdot \frac{f_1}{p} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

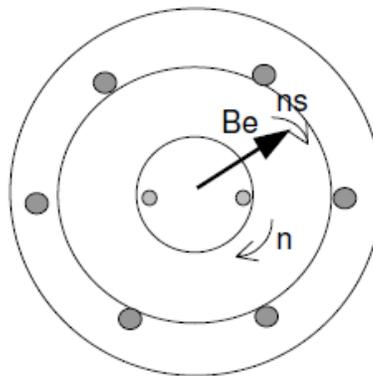
Donde:

$p$  es el número de pares de polos por fase del arrollamiento( se repite  $p$  veces la distribución de bobinas del estator).Si en el rotor hay una espira, el campo magnético

rotativo concatenado por dicha espira es variable (pues cambia su dirección al girar el campo), induciéndose una f.e.m..

En el caso del rotor en jaula de ardilla, por tratarse de bobinas de muy baja resistencia óhmica (barras metálicas de cobre, bronce o aleaciones similares) y de reactancia inductiva variable, se generará una corriente eléctrica importante. Esta corriente, en acción conjunta con el campo magnético rotativo, creará cuplas distribuidas a lo largo de cada barra haciendo que el rotor gire en el mismo sentido que el campo giratorio ( $B_e$ ), con una velocidad  $n$  (véase figura 2.5). La velocidad de giro del rotor nunca puede alcanzar a la de giro del campo pues en ese caso no habría variación del flujo concatenado por el bobinado del rotor y por lo tanto no habría f.e.m., ni corriente en el rotor.

En condiciones nominales de carga el motor gira a una velocidad  $n < n_s$ . Esta diferencia, expresada en relación a la velocidad de sincronismo, se denomina deslizamiento o resbalamiento  $s$ .



**Figura 2. 4** Campo magnético (Mazzeo & Bertolotti, 2009)

$$s = \frac{ns - n}{ns} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

De donde:

$$n = (1 - s).ns$$

La frecuencia de las tensiones inducidas en las barras del rotor ( $f_2$ ) vendrá dada por:

$$f_2 = \frac{ns - n}{ns} \cdot \frac{p}{60} = sfs \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

ns: velocidad de sincronismo

n: velocidad medida

### 2.2.5 CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO

La velocidad variable es una necesidad en todos los sectores de la industria, pues permite el control de la producción de un proceso o de un sistema con el gasto mínimo de energía y de materia prima. También es útil en aplicaciones de domótica, tales como el control de calderas, ventilación y aire acondicionado. Hasta hace algunos años, cuando se necesitaba variar velocidad de accionamientos, se recurría a sistemas mecánicos o a motores de corriente continua. Los avances de la electrónica y su abaratamiento fueron desplazando los sistemas mecánicos, por el costo de su mantenimiento, en favor del motor de corriente continua controlado electrónicamente.

Sin embargo este tipo de motor requiere mantenimiento periódico, como el cambio de escobillas y rectificación de colector, que insume costo y tiempo afectando fuertemente los procesos industriales continuos tales como petroquímicas, siderúrgicas, etc.

Sin duda el motor más barato y confiable de la industria es el motor de inducción. Al acoplársele un sistema electrónico de control de velocidad, se obtienen las mismas prestaciones de un motor de corriente continua, esto es, control de torque de arranque, velocidad, aceleración y posibilidad de realizar frenado regenerativo. Las enormes ventajas del motor de inducción con rotor en cortocircuito sumadas a la confiabilidad del controlador electrónico asociado hicieron que los costos de utilización fueran reduciéndose, resultando ,en la actualidad, competitivos.

### **2.2.6 DESCRIPCIÓN DE TÉCNICAS PARA CONTROL DE VELOCIDAD**

Por lo tanto para variar la velocidad se puede proceder de dos formas :

- Cambiar la curva de par - velocidad a fin de variar el deslizamiento.
- Variar la velocidad sincrónica

Para variar la forma de la curva se puede actuar sobre los parámetros del motor (resistencia estatórica, resistencia rotórica, inductancia rotórica) o sobre la tensión de alimentación. Hoy en día estas técnicas se utilizan fundamentalmente para el control durante el arranque del motor.

Para variar la velocidad sincrónica se utilizaba la variación en la cantidad de pares de polos, mediante un devanado con conexiones conmutables. Actualmente se utiliza la variación de frecuencia a través de los variadores de frecuencia.

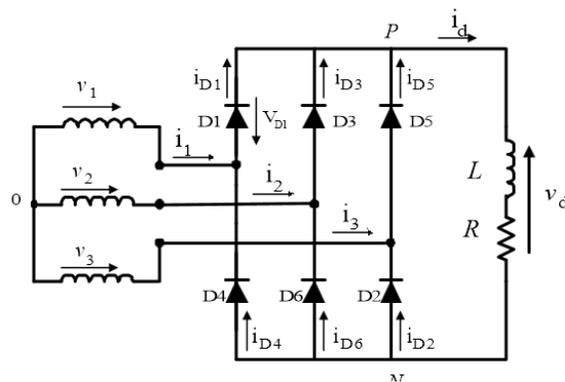
## 2.6 VARIADORES DE FRECUENCIA

En el tema anterior se describieron varias técnicas y estrategias para controlar motores de inducción. El dispositivo que permite llevar a cabo este control es llamado convertidor de frecuencia (También variador de velocidad). Está conformado de algunas etapas que se describirán a continuación:

### 2.6.1 RECTIFICADOR

Una de las configuraciones más utilizadas en los convertidores es el trifásico B6 conformado por seis diodos o puente de Graetz. (ver figura 2.8) y tiene las siguientes ventajas:

1. Se absorben menos armónicos de intensidad en la línea trifásica.
2. La tensión continua es de rizado mucho menor
3. Se puede variar el Angulo de encendido seis veces por periodo.



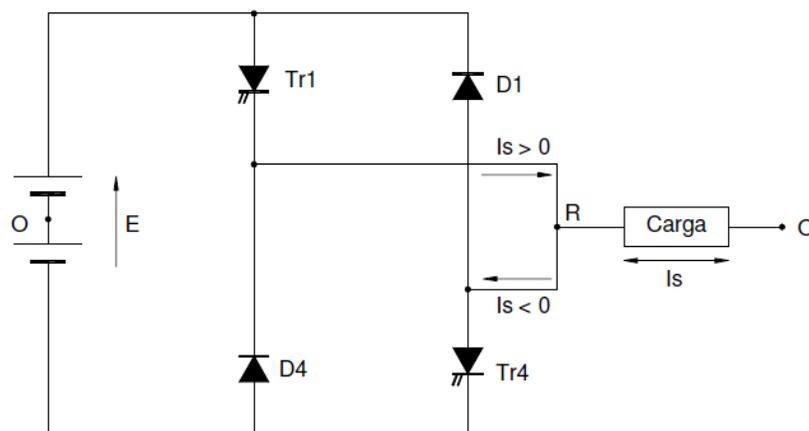
**Figura 2.5** Rectificador (Rodríguez, 2007)

## 2.6.2 CIRCUITO INTERMEDIO

Esta etapa intermedia de continua funciona como fuente de tensión para la etapa final (Ondulador). En esta etapa generalmente se coloca un condensador electrostático para mantener la tensión constante entre los terminales (+) y (-), luego se coloca una inductancia en serie con una de sus ramas para mantener constante la intensidad.

## 2.6.3 ONDULADOR

El ondulator con modulación de anchura de pulso está formado por dos troceadores, uno para cada polaridad. Tr1 y Tr4 generalmente son tiristores o transistores según la potencia de salida del convertidor, estos permiten aplicar sobre la carga una tensión  $+E/2$  o  $-E/2$  durante el tiempo de conducción determinado por el circuito de control. Las leyes de modulación determinan la conducción de los troceadores y se implementan mediante microprocesadores incorporados en la tarjeta de control en la figura 2.9 se observa el circuito común de un ondulator.



**Figura 2. 6** Ondulador

Los onduladores PWM para motores de bajas y medias potencias (hasta 500kW) utilizan troceadores de tipo IGBT (Transistores bipolares de compuerta aislada) o transistores de efecto de campo (MOSFET). Estos tienen un tiempo de conmutación inferior a los 16kHz, por encima del rango audible, de manera que los componentes magnéticos no producen ruidos acústicos objetables. Los tiristores en cambio se utilizan desde los 500kW en adelante.

## **2.7 DIMENSIONAMIENTO DE VARIADORES DE FRECUENCIA**

La exactitud en el dimensionamiento de los variadores de frecuencia es de fundamental importancia en el momento de la ingeniería. La corriente del motor no debe ser el único requisito para la elección del convertidor, siendo que el tipo de carga y la aplicación tomados en consideración.

### **2.7.1 PUNTOS CLAVE PARA LA SELECCION**

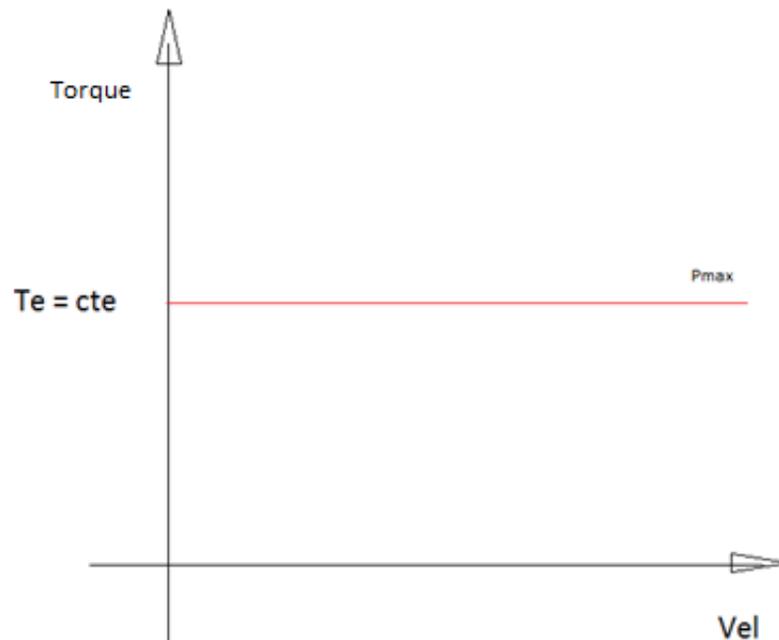
El éxito de toda aplicación donde se planea utilizar un variador de velocidad es establecer adecuadamente el torque o par. En las aplicaciones industriales modificar la velocidad implica también disponer del torque necesario para dicha acción. En una intención de clasificar las aplicaciones por el torque requerido a diferentes velocidades de trabajo podríamos agruparlas de la siguiente manera:

1. Torque constante
2. Torque variable o cuadrático
3. Torque proporcional
4. Potencia constante

### 2.7.2 TORQUE CONSTANTE

"En este tipo de máquinas o aplicaciones el torque permanece constante a cualquier velocidad. Aplicaciones dentro de esta clasificación son: bandas transportadoras, grúas, ascensores, prensas de imprenta, etc. En este tipo de aplicaciones es imposible ahorrar energía por variación de velocidad." (Pino, 2009)

En la figura 2.10 se ilustra la curva torque vs velocidad en una aplicación de par constante.



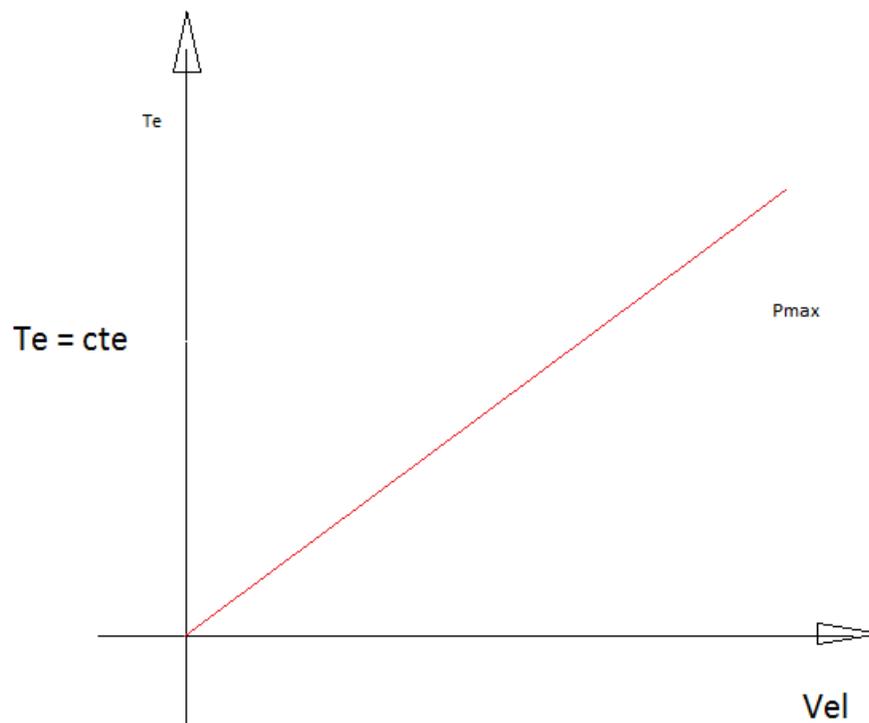
**Figura 2.7** Curva aplicación Par constante

### 2.7.3 TORQUE PROPORCIONAL

"En este tipo de aplicaciones el torque crece de manera directamente proporcional a la velocidad. Este comportamiento lo podemos encontrar en máquinas como:

mezcladoras, bombas de desplazamiento positivo, calandrias, extrusoras, es decir se puede encontrar gama de aplicaciones especialmente en el tratado y producción de plásticos y alimentos." (Pino, 2009)

En la figura 2.11 se ilustra la curva torque vs velocidad en una aplicación de par variable.



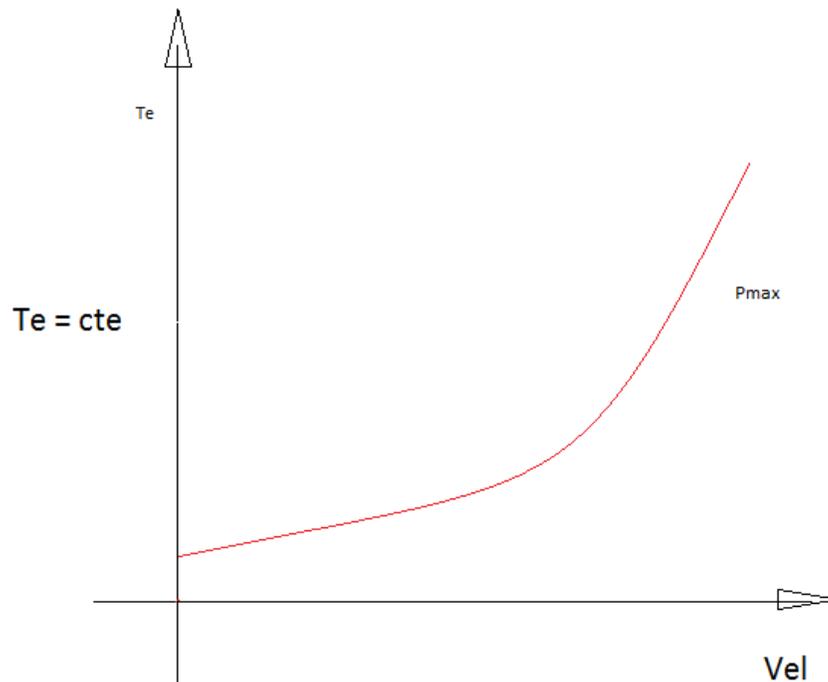
**Figura 2. 8** Curva aplicación Par proporcional

#### 2.7.4 TORQUE CUADRÁTICO O VARIABLE

La demanda de torque de la aplicación varia de forma cuadrática con respecto a la velocidad del motor, es decir a bajas velocidades implicara un bajo torque y un menor

consumo de energía, a mayores velocidades implicara mayor torque y el consumo de energía será cercano al de la placa del motor. Ejemplos prácticos de este tipo son los ventiladores, bombas, compresores. Se ilustra la curva característica de este tipo de cargas en la figura 2.12.

En estos casos el variador de velocidad podría ofrecer grandes oportunidades de ahorro de energía entre el 30 y 40% pues los requerimientos de consumo de potencia disminuye conforme lo hace la velocidad del motor.



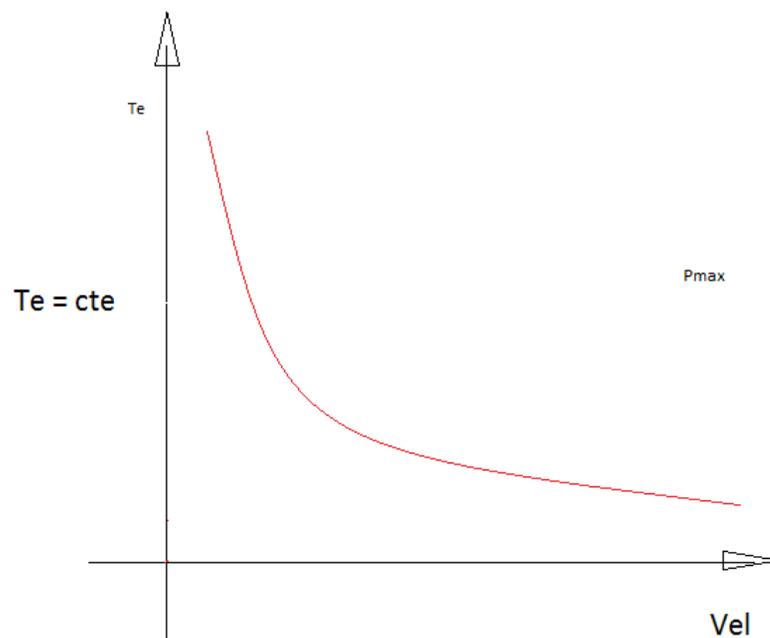
**Figura 2.9** Curva aplicación par variable

### 2.7.5 POTENCIA CONSTANTE (TORQUE INVERSO)

"El par demandado por la carga aumenta a mediad que la velocidad disminuye (inversamente proporcional), de forma que la potencia permanece constante. Ejemplos

de aplicaciones: bobinadoras y desbobinadores, máquinas de corte, tornos, taladros, sierras eléctricas, molinos." (Pino, 2009).

En la figura 2.13 se ilustra la curva torque vs velocidad en una aplicación de torque inverso.



**Figura 2. 10** Curva aplicación Potencia constante

## 2.8 RESUMEN CONSIDERACIONES GENERALES DE SELECCIÓN

- Verificar el rango de corriente tanto del variador como del motor.
- Chequear que se haya seleccionado el voltaje de operación correcto de alimentación y salida del variador.
- Confirmar el rango de velocidad requerido.

- En caso de requerir frenado rápido, considerar el uso de un resistor de frenado para disipar la energía regenerativa.
- Tomar en cuenta las condiciones ambientales tales como la temperatura ambiente y altura sobre el nivel del mar debido a la posibilidad de que el equipo sea derrateado.
- Considerar el uso e instalación de una inductancia en la entrada si existen aparatos sensibles a los armónicos.

## **2.10 MOTORREDUCTORES**

"Los reductores de velocidad son sistemas que permiten que los motores eléctricos funcionen a diferentes velocidades para los que fueron diseñados. En muchos sectores de la industria se requiere de equipos cuya función sea la de adaptar la velocidad de un motor (1.800, 1.600 o 3.600rpm) a la velocidad de la máquina ((50, 60, 100 rpm)." (Baumeister & Avallone, 1978)

Esta adaptación se realiza generalmente con uno o varios pares de engranajes que adaptan la velocidad y potencia mecánica montados en un cuerpo compacto denominado caja reductora.

Algunos de las ventajas en su uso se describen a continuación:

- Buena transmisión de potencia y velocidad.
- Mayor seguridad en la transmisión.
- Bajos costos de mantenimiento
- Menor tiempo de instalación.

La unidad reductora comúnmente viene acoplada a un motor eléctrico normalizado asíncrono tipo jaula de ardilla, totalmente cerrado y refrigerado por ventilador para conectar a redes trifásicas de 220/440 voltios y 60 Hz. Los reductores se pueden clasificar por el tipo de sus engranajes, los más usuales son: Sin fin-Corona, engranajes y planetarios.

## 2.10 SENSORES INDUCTIVOS

"Los sensores inductivos son una clase especial de sensores que sirven para detectar materiales metálicos ferrosos. Son de gran utilización en la industria, tanto para aplicaciones de posicionamiento como para detectar la presencia o ausencia de objetos metálicos en un determinado contexto: detección de paso, de atasco, de codificación y de conteo." (Wikipedia la Enciclopedia Libre)

Estos sensores utilizan detección sin contactos y circuitos de estado sólido para asegurar la durabilidad en los ambientes más agresivos. Se puede observar un esquema de construcción de un sensor inductivo en la figura 2.17 a continuación. No existe energía mecánica que haga que el sensor cambie de estado, el sensor de proximidad depende de la energía eléctrica para cambiar de estado.

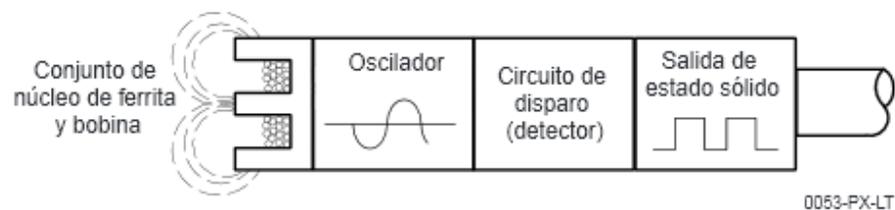


Figura 2. 11 Esquema de un sensor inductivo (Automation & Bradley, 2000)

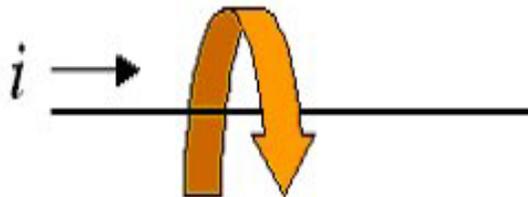
Los sensores inductivos detectan objetos metálicos en áreas de exploración generalmente muy pequeñas. El diámetro del sensor es el factor decisivo para la

distancia de conmutación, que con frecuencia es de sólo unos cuantos milímetros. Por otra parte, los sensores inductivos son rápidos, precisos y extremadamente resistentes.

"Los sensores inductivos también permiten medir otras magnitudes siempre y cuando se cuente con un acondicionamiento o equipos adecuados. Entre las principales ventajas de estos sensores cabe señalar que les afecta poco la humedad ambiental y otros contaminantes, a diferencia de los sensores capacitivos, imponen poca carga variable y poseen alta sensibilidad" (Aren, 2001)

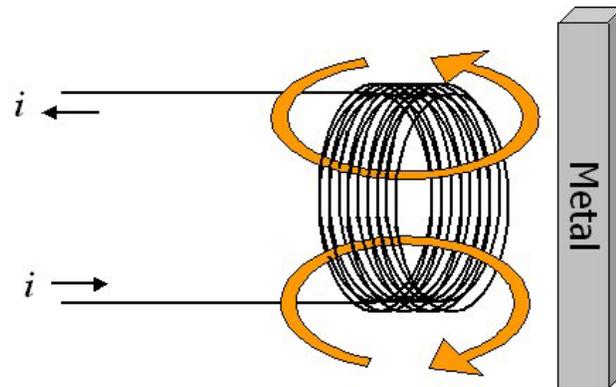
### 2.11.1 CONCEPTOS TEÓRICOS

Cuando una corriente circula a través de un conductor, se genera un campo magnético alrededor del mismo. En la Figura 2.18 se observa una corriente ( $i$ ) que circula por el hilo conductor generando un campo magnético.



**Figura 2. 12** Campo magnético asociado

Los sensores inductivos poseen un bobinado interno. Cuando el sensor es alimentado, una corriente circula por el mismo y genera un campo magnético como se indica en la Figura 2.19. Cuando un metal es acercado se produce una variación de este campo. La variación afecta al oscilador del sensor y el circuito detector procede a enviar una señal al amplificador de salida para cambiar el estado de la salida.



**Figura 2. 13** Campo magnético en un sensor inductivo

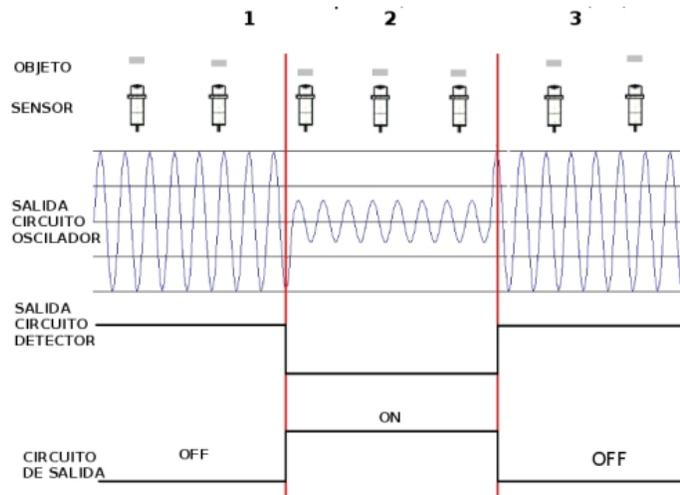
Cuando el metal es alejado o sale fuera del rango de detección del sensor, el oscilador puede volver a generar el campo magnético con su amplitud normal. En este momento se produce nuevamente un cambio de impedancia que es detectado y enviado al amplificador para que la salida sea restituida a su estado original.

### 2.11.2 ESTADOS DE UN SENSOR INDUCTIVO

Los estados de cada uno de los componentes de un sensor inductivo varían en función de la distancia existente entre el sensor y el objeto metálico a detectar (ver figura 2.20).

1. Objeto a detectar ausente.
2. Objeto a detectar dentro del rango de detección.
3. Objeto a detectar sale del rango de detección.

"La distancia de operación de un sensor de proximidad inductivo varía para cada objeto y cada aplicación. La capacidad de un sensor de detectar un objeto depende del material del objeto, de su tamaño y forma" (Automation & Bradley, 2000)



**Figura 2. 14** Estados sensor inductivo (Wikipedia la Enciclopedia Libre)

### 2.11.3 RANGO DE DETECCIÓN

El factor más obvio que determina el rango es el tamaño del sensor. La fuerza del campo irradiado depende del tamaño del núcleo del sensor. Los sensores más grandes tienen núcleos más grandes y, por lo tanto, mayores rangos. Es importante seleccionar siempre un sensor que sea suficientemente grande para proporcionar un rango adecuado para la aplicación. Un sensor de proximidad siempre debe de operar de 50% a 80% de su rango a fin de evitar condiciones marginales que podrían dar falsos contactos.

El rango real de detección es el rango nominal de detección  $\pm 10\%$ . El rango nominal se deriva de probar cada sensor de proximidad inductivo en un objetivo de acero dulce suficientemente grande para cubrir la cara activa del sensor. El rango real toma en consideración las variaciones en la fabricación. Para asegurar una operación libre de

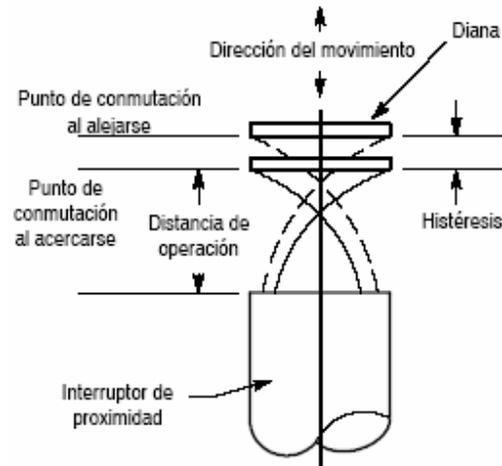
problemas en todas las condiciones de trabajo, los objetivos deben detectarse a 80% de su rango nominal, conocido como “rango de trabajo”.

#### **2.11.4 HISTÉRESIS**

La diferencia entre los puntos de encendido y apagado se llama histéresis, y proporciona un funcionamiento estable al evitar que el sensor oscile entre los estados de encendido y apagado. (ver figura 2.21)

Lo que es lo mismo, la diferencia entre los puntos de activación y relajación de un sensor se denomina histéresis o recorrido diferencial de éste. La distancia entre la posición de un objeto cuando se detecta y la posición del mismo cuando deja de estarlo ha de tenerse en cuenta al elegir la posición, tanto de los objetos a detectar como del sensor.

La histéresis es necesaria para evitar fenómenos de rebote u oscilación (conmutación rápida entre estados) cuando el sensor se halla sometido a choques o vibraciones o cuando el objeto a detectar se halla estacionario a la distancia nominal de detección. La amplitud de las vibraciones ha de ser menor que el recorrido de histéresis (banda de histéresis) para evitar fenómenos de rebote.



**Figura 2. 15** Histéresis de un sensor inductivo

### 2.11.5 TERMINOLOGÍA

(Un) Tensión de alimentación asignada.

(Sn) Alcance nominal: Alcance que sirve para designar el aparato.

(Tn) Temperatura de trabajo asignada.

### 2.12. SENSORES FOTOELÉCTRICOS

Un sensor fotoeléctrico es un dispositivo electrónico que responde al cambio en la intensidad de la luz. Estos sensores requieren de un componente emisor que genera la luz, y un componente receptor que percibe la luz generada por el emisor.

Están diseñados especialmente para la detección, clasificación y posicionado de objetos; la detección de formas, colores y diferencias de superficie, incluso bajo condiciones ambientales extremas.

"Los detectores fotoeléctricos se emplean tanto en aplicaciones donde se mide la luz como en aplicaciones donde la luz se emplea como medio para detectar otra magnitud o estado. Se comercializan modelos constituidos por un par emisor-detector e incluso conectados a un relé para el control" (Aren, 2001)

Los sensores ópticos están conformados por las siguientes partes:

- Fuente.
- Receptor.
- Lentes.
- Circuito de salida.

### **2.12.1. MODOS DE DETECCIÓN**

Los sensores fotoeléctricos comúnmente se fabrican con tres configuraciones diferentes:

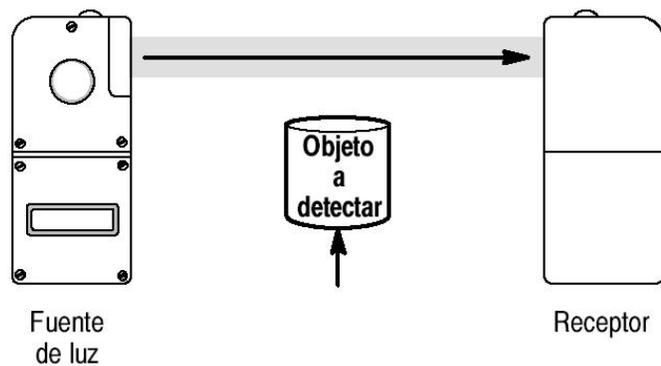
- Transmisión directa
- Modo reflexivo
- Modo difuso

- **TRANSMISIÓN DIRECTA**

El emisor se coloca en frente del receptor y el objeto es detectado cuando pasa entre ambos, esta característica hace que la distancia de alcance sea muy larga, alrededor de 270 metros(ver figura 2.24). Su principal desventaja se presenta durante el montaje en

campo ya que conlleva un gasto adicional de cableado y materiales para la instalación de dos dispositivos. Se ilustra este tipo de transmisión en la figura 2.24 a continuación.

"Los sensores de haz transmitido proporcionan las distancias de detección más largas y mayor nivel de margen de operación. Por ejemplo, algunos sensores pueden detectar objetos a distancias de hasta 274m. Por esta razón, el haz transmitido es la mejor opción para ambientes industriales muy sucios o polvorientos." (Automation & Bradley, 2000)

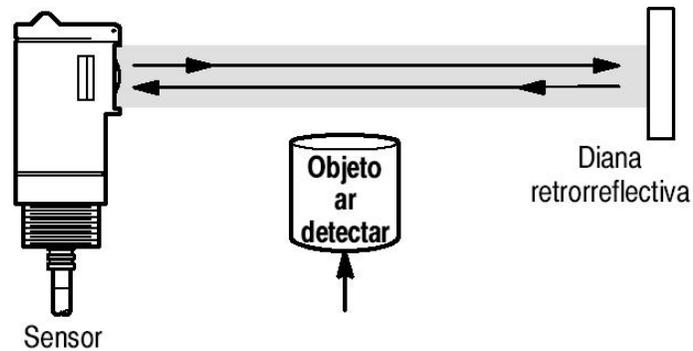


**Figura 2. 16** Modo directo (Indriago, 2009)

- **REFLECTIVO**

El emisor y el receptor se colocan en el mismo sitio uno al lado del otro y en frente de ellos se coloca una superficie reflexiva. El haz de luz emitido choca contra el reflector para ser registrado por el receptor (ver figura 2.25). La detección ocurre cuando pasa el objeto impidiendo el haz de luz llegue hasta el receptor. Esta configuración, que es la de uso común, tiene la ventaja de que el emisor y el receptor vienen en el mismo empaque y utilizan el mismo ducto para el cableado, pero las distancias de detección son varias veces menor que en la configuración de transmisión directa.

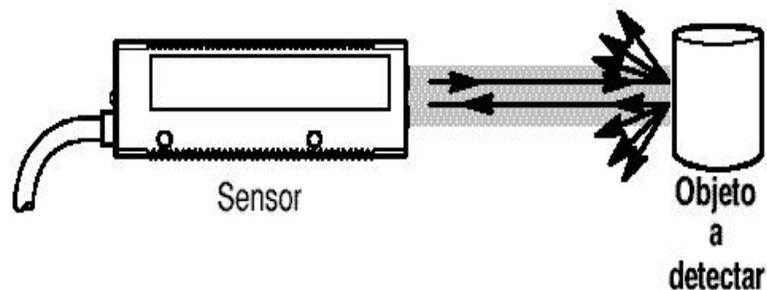
"Los sensores retro reflectivos evitan la detección de objetos brillantes. La detección por el modo reflectivo es el tipo de detección más usado cuando los objetos son grandes, el ambiente es relativamente limpio y los márgenes de detección son de 0.6 a 4.5 m" (Automation & Bradley, 2000)



**Figura 2. 17** Modo reflexivo

- **DIFUSO**

"Esta configuración se parece a la reflexiva sólo que ésta no utiliza el espejo sino que el objeto a detectar es el que sirve de reflector." (ver figura 2.26) (Indriago, 2009)



**Figura 2. 18** Modo difuso

Para lograr que objetos poco brillantes puedan ser detectados, el haz de luz no se transmite en una sola dirección como en las configuraciones anteriores, sino que viaja en varias direcciones. Esta configuración presenta la desventaja de tener muy corta distancia de detección, pero es muy útil cuando es difícil acceder ambos lados de objeto.

## **CAPÍTULO 3**

### **DESARROLLO DEL HARDWARE Y SOFTWARE**

#### **3.1 HARDWARE DE FÁBRICA**

##### **3.1.1 ANTECEDENTES**

La rebobinadora Rebograf Lite 1200 de fabricación brasileña fue concebida con el fin de facilitar varias tareas cotidianas en corte, rebobinado, y refinado del material a

trabajar, para este fin Grafictron Brasil construyo un sistema eléctrico – electrónico basado en módulos especializados en una tarea específica.

En la figura 3.1 se observa la distribución original de los módulos de control en el panel frontal de operación. Los módulos proporcionados desde la fabrica son:

- Módulo Contador de metraje CONTAGRAF: Display digital
- Velocidad de bobinado TACOGRAP: Display digital
- Módulo de bobinado 1
- Módulo de bobinado 2
- Control de tensión: Balanza GSE 350, Display digital
- Control de alineación ALINEAGRAF.



**Figura3. 1** Módulos de control brasileños - Rebograf Lite 1200

El sistema fue diseñado a mediados de los años 80, con la tecnología de automatización existente, en aquellos tiempos los sistemas de control eran de tecnología cerrada, es decir, sus módulos electrónicos no eran estándar y eran especializados en una tarea específica; por ello es necesario realizar una evaluación de la funcionalidad, operatividad, seguridad, y protecciones del sistema original con el fin de construir un sistema sólido y confiable que abarque todos los sistemas modulares que se mencionan en el párrafo anterior.

En esta sección se muestran los resultados de la revisión del hardware existente de fabrica con la finalidad de conocer a detalle el funcionamiento del conjunto así como también sus limitaciones y problemas de operación. Además se detallan algunos procesos de readecuación realizados a la máquina con el fin de garantizar el correcto funcionamiento mecánico de la misma.

### **3.1.2 DESCRIPCIÓN Y READECUACIÓN DEL CONJUNTO ELECTROMECAÁNICO DE LA MÁQUINA**

La máquina posee dos cuerpos totalmente diferenciables, el primero de ellos, de mayor volumen, llamado “Cuerpo de Rebobinado - Corte”, es el encargado de albergar los motores encargados del proceso de rebobinado, el otro cuerpo de menor volumen, llamado “Cuerpo de Alineamiento y desbobinado”, es el encargado del alineamiento del material. A continuación se describen los equipos existentes en cada uno de los cuerpos ya definidos.

**Cuerpo Rebobinado - Corte:** La máquina posee un conjunto de 3 motores principales AC, encargados del desbobinado y rebobinado, además posee dos motores de baja potencia: uno de ellos encargado de suministrar ventilación “forzada” a los motores, el otro encargado de la succión del material de desecho del proceso de corte "refilo".

Para el control de los motores principales (desbobinado, rebobinado superior, rebobinado inferior) la máquina cuenta con 3 variadores de frecuencia marca WEG CFW-08, el arranque de los motores pequeños (ventilación forzada, refilo) se hace mediante arranque directo. Los comandos de control y referencia de velocidad de los variadores son enviados por los módulos Tacograf y Rebograf 1 y 2.



**Figura3. 2** Cuerpo de rebobinado antiguo

En la figura 3.2 se muestra el conjunto de rebobinado antiguo, se observa la degradación mecánica del sistema por lo cual se solicita al personal la readecuación del conjunto mecánico. El mecanismo de corte, es muy sencillo y está formado por varios

rodillos auxiliares cuya función es estirar el material y evitar que se formen arrugas en el mismo, es el sistema intermedio de la máquina y del cual depende la calidad, y el ancho de las bobinas a producir. Posee un brazo auxiliar mediante el cual se colocan cuchillas a una distancia determinada para cortar la película de propileno. Los rodillos de esta etapa no poseen sistema de tracción se mueven únicamente siguiendo el movimiento determinado por los sistemas de desbobinado y rebobinado, se puede observar el sistema readecuado en la figura 3.3.



**Figura3. 3** Cuerpo de rebobinado - corte readecuado

**Cuerpo alineador - desbobinador:** El desbobinador está constituido por un rodillo especial para sostener todo el peso de la bobina madre a cortar, este rodillo posee un sistema de frenado neumático el cual está encargado de evitar que exista deslizamiento de la bobina debido a la inercia generada por el rollo madre de aproximadamente 300Kg.

El rodillo de des bobinado es impulsado por un motor trifásico en conjunto con un sistema reductor.

En este mismo sistema se encuentra el alineador de material, que es un conjunto de sensores y un motorreductor pequeño los cuales se encargan de posicionar al material a ser rebobinado de tal manera que el rollo a ser entregado sea uniforme en sus extremos sin protuberancias de material. El sistema de alineamiento constaba de un motor de alimentación 24Vdc 0.75HP, poseía un sistema de reducción mediante un tornillo sin fin el cual se acopla a la base del cuerpo del motor dc de alineamiento. El movimiento del tornillo sin fin producía un suave movimiento oscilatorio con el que se aseguraba el alineamiento del material enviado al cuerpo de rebobinado. Este pequeño motor estaba controlado por el módulo Alineagraf, para la alimentación del motor dc existía una fuente auxiliar de 24Vdc de gran tamaño montada en el interior del tablero de motores. Se puede observar el cuerpo de rebobinado antiguo en la figura 3.4 a continuación.



**Figura3. 4** Sistema de alineación antiguo

El sistema de alineamiento existente no funcionaba correctamente debido a problemas en los componentes electrónicos internos de la fuente de alimentación, es por esta razón que se plantea la construcción de un nuevo sistema basado en un motor de corriente alterna trifásico y un reductor de eje hueco, con el fin de adaptar el tornillo sin fin existente, se realiza el trabajo de readecuación con el personal de mantenimiento.

Este sistema en conjunto realiza el trabajo más demandante y marca el punto de inicio del proceso. Se puede observar el conjunto readecuado en la figura 3.5.



**Figura3. 5** Cuerpo de desbobinado readecuado

En la **Figura 3.5** podemos apreciar:

1. Freno neumático
2. Sistema motor - reductor - tornillo sin fin (alineamiento)
3. Porta bobina

Con las readecuaciones mecánicas pertinentes realizadas, se procederá a revisar el funcionamiento del sistema de control original de fabrica para generar un nuevo sistema de control que tenga todas las bondades del sistema original, mas no sus problemas y defectos de operación.

## **3.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ORIGINAL**

### **3.2.1 ANÁLISIS DEL MODO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA ORIGINAL**

La máquina cuenta con los siguientes módulos de control del proceso: Alineagraf, Contagraf, Tacograf, GSE 350. Cada módulo debe ser supervisado continuamente por el operador mientras la máquina funciona, debido a la distribución original de los módulos es imposible supervisar todo el sistema al mismo tiempo ya que estos se encuentran divididos en el panel frontal de la máquina y los restantes en el panel trasero de la máquina.

Se ilustra el panel frontal de módulo Contagraf en la figura 3.6, se destaca el contador análogo en el centro del mismo, se observa la tarjeta electrónica interna del módulo.

Para cumplir con el proceso de supervisión, el operador deberá rodear la máquina y ubicarse frente a cada panel de la rebobinadora, o a su vez será necesario asignar otro operador de la máquina para poder supervisar de manera correcta todo el proceso.



**Figura3. 6** Módulo control Contagraf

Para realizar cambios en los setpoints de máquina es necesario manipular todos los módulos de control, por lo cual el operario debe tener sólidos conocimientos del funcionamiento de la máquina y también del funcionamiento del sistema eléctrico - electrónico de la misma. Desde el punto de vista operativo la configuración y operación de los módulos dista de ser la ideal, por lo cual la máquina deja de ser una opción viable de producción debido a sus altos requerimientos de personal y capacitaciones continuas debido a la rotación interna de los operadores.

Otro punto negativo del sistema modular de control es la inexistencia de repuestos y soporte en el país. Este punto también encarece los costes de mantenimiento de la máquina en caso de un daño severo ya que si este fuera el caso los módulos deberán ser fabricados bajo pedido al fabricante y también deberían ser importados desde el país de origen.

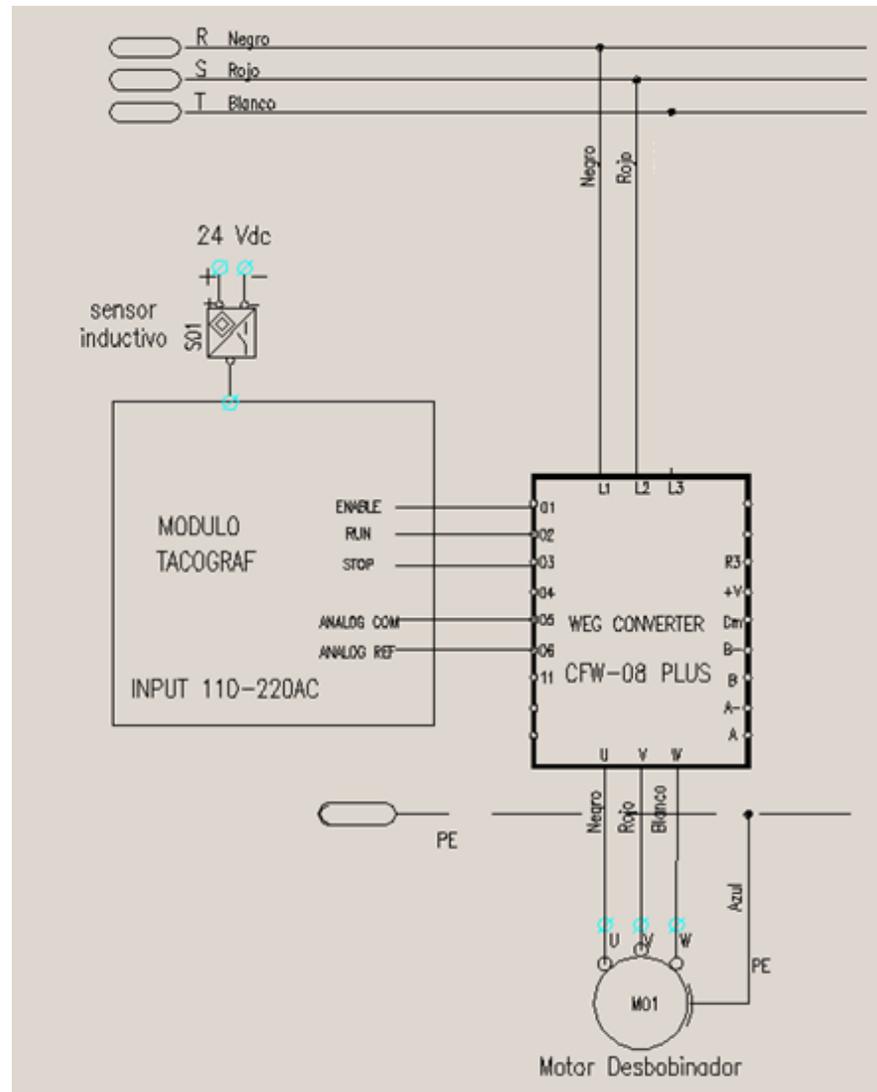
---

### 3.2.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL

La maquina existente no posee documentación técnica completa, existen únicamente los manuales de operación de la máquina que se obtienen fácilmente desde la web, los planos y esquemas son inexistentes por lo cual fue necesario realizar la revisión del cableado del sistema punto por punto, afortunadamente las conexiones del sistema se basan en conectores de 4 pines circulares para conectar los sensores y para las alimentaciones de los módulos. Se realizan el levantamiento de los planos de todo el sistema original de fábrica, incluyendo el tablero de fuerza.

El diseño original de fábrica de este sistema está enfocado en la simplicidad, sus elementos de control son únicamente contactores, breaker principal y variadores de frecuencia; sin embargo en esta distribución no existen las correctas protecciones para los elementos más importantes y más caros de este tablero, como es el caso de los convertidores WEG. Es necesario añadir nuevos elementos de protección de los equipos para solventar este inconveniente en el rediseño del sistema.

En la figura 3.7 muestra el esquema eléctrico de conexión del módulo Tacograf cuya función es controlar el motor de desbobinado M01, el sensor utilizado es un inductivo a manera de contador de pulsos como realimentación del módulo. Se observa que los comandos de arranque y paro se realizan mediante contactos internos del módulo Tacograf y la referencia de velocidad analógica la proporciona el mismo módulo de control, no existe ningún elemento de protección para cuidar el funcionamiento del variador de velocidad, sin embargo existen fusibles de 2A en cada una de las tarjetas electrónicas de todos los módulos para proteger los componentes sensibles.



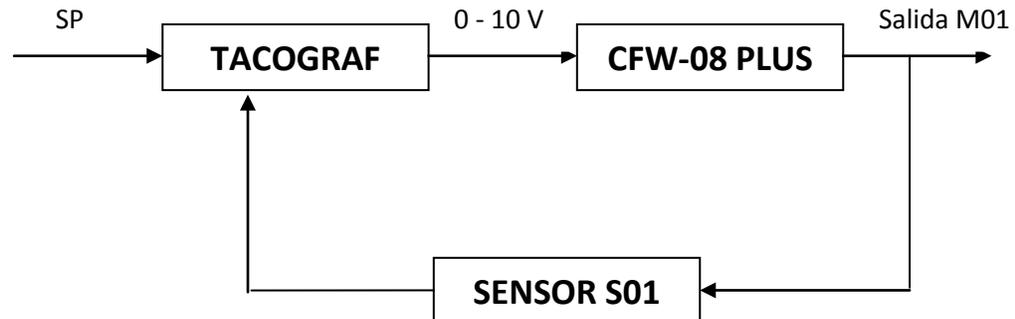
**Figura3. 7** Esquema eléctrico de control y fuerza variador M01 desbobinador

El sistema original describe dos lazos de control principales: lazo cerrado de control de velocidad de desbobinado, y lazo abierto de control de velocidad de rebobinado.

- **LAZO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE DESBOBINADO:** Para el lazo de control de desbobinado tenemos como realimentación al sensor inductivo S01 de tipo inductivo con salida PNP, alimentación y salida a 24Vdc, este detecta la cercanía de una

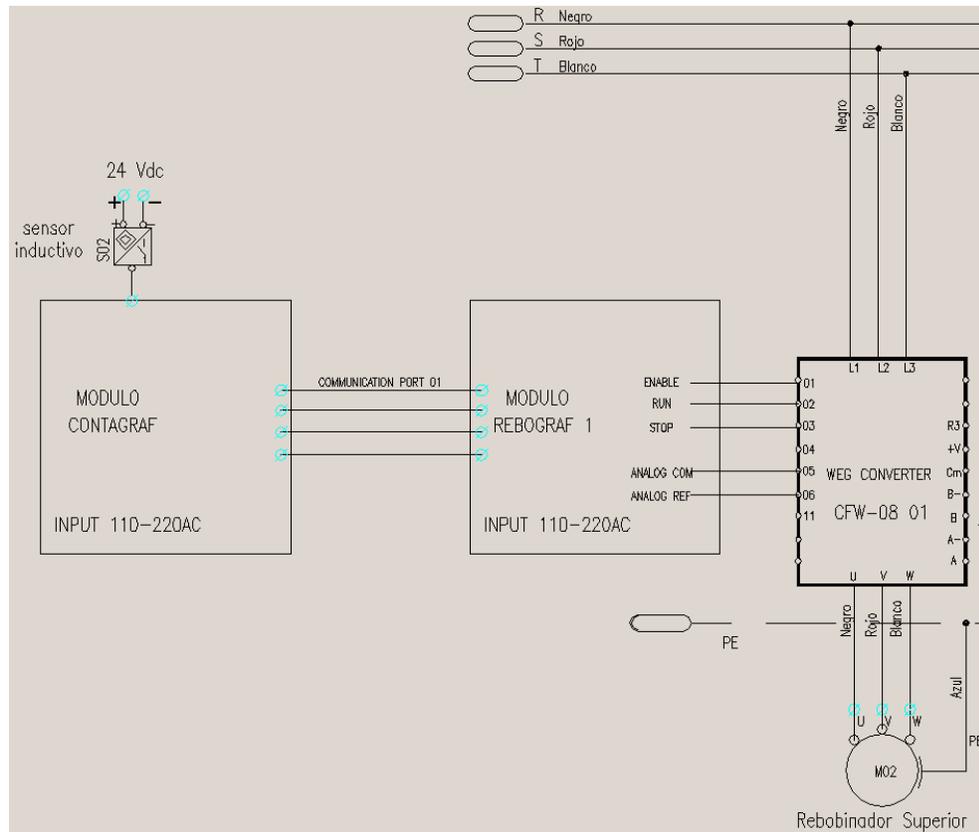
de las dos piezas metálicas acopladas al eje del rodillo desbobinador, los pulsos emitidos son procesados en el módulo Tacograf y contrastados con la velocidad de máquina ingresada en el panel.

Si existe diferencia en el valor ingresado y el valor de velocidad real del desbobinador, el módulo regulará su salida analógica de tal modo que corrija el error existente. El variador de velocidad CFW-08 PLUS recibe la señal analógica de 0 - 10 Vdc y regula su salida hacia el motor M01.



**Figura3. 8** Lazo de control de velocidad del desbobinador

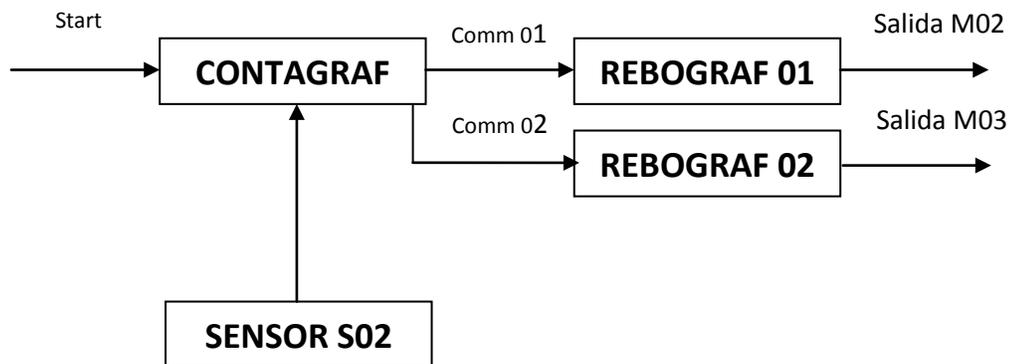
- **LAZO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE REBOBINADO:** El lazo de control de velocidad de los rebobinadores, tiene un funcionamiento diferente, y trabaja mediante un lazo abierto, en este intervienen los módulos CONTAGRAF, REBOGRAF 1 Y REBOGRAF 2, en la figura 3.9 a continuación se observa el esquema de conexión eléctrico de este lazo en su rama del motor de rebobinado inferior M02.



**Figura3. 9** Esquema eléctrico del lazo de control de velocidad rebobinadores

En este lazo (ver figura 3.10) observamos que el set point hacia los módulos Rebobraf es enviado mediante un puerto de comunicaciones desde el módulo Contagraf. La función del módulo Contagraf consiste en llevar la cuenta de la longitud del material procesado en [pies], este módulo cuenta también con un sensor inductivo S02 ubicado a 180 grados de separación del sensor inductivo S01, mediante este sensor el módulo Contagraf es capaz de determinar cuantas vueltas ha dado el rodillo de desbobinado y muestra en el display analógico el valor de la longitud procesada.

Este valor de longitud es transmitido mediante el puerto de comunicaciones 01, hacia el módulo Rebobraf 1, y mediante el puerto de comunicaciones 02, es transmitido hacia el módulo Rebobraf 2.

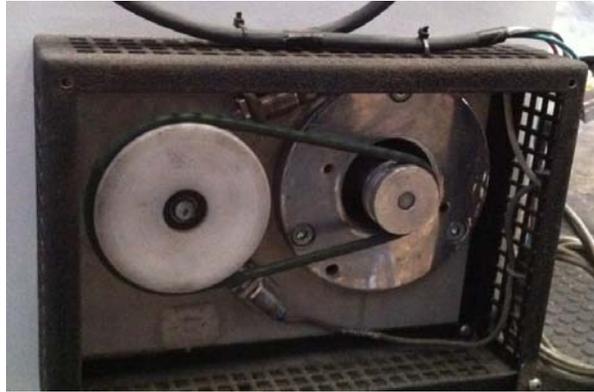


**Figura3. 10** Lazo de control de velocidad rebobinadores

En los módulos de rebobinado el operario puede configurar el espesor del material además se pueden realizar ajustes finos en la velocidad de cada rebobinador con el fin de dar más tensión al material.

Los módulos Rebobraf irán ajustando la velocidad en función de la longitud procesada e irán disminuyendo la frecuencia de salida de los variadores de frecuencia de cada motor de rebobinado con el fin de mantener la misma velocidad de máquina, es decir la misma velocidad que tiene el desbobinador.

En la figura 3.11 se puede observar el conjunto mecánico donde se ubican los sensores inductivos utilizados por los módulos de control.



**Figura3. 11** Conjunto mecánico para el conteo de vueltas del rodillo desbobinador

La maquina además contaba con pocos elementos de maniobra y control, en la figura 3.12 se observa la ubicación de los pulsantes existentes al igual que los selectores y luces piloto. Los selectores presentes tenían como función cerrar los circuitos de arranque directo, Motor de refilo y ventilación forzada. En la esquina superior derecha observamos los botones de start y stop del sistema. En la parte central inferior observamos los pulsantes de emergencia y paro. En el centro se ha realizado ya el montaje de la pantalla táctil que forma parte del rediseño del sistema.



**Figura3. 12** Elementos de maniobra y control

---

- **TABLERO DE FUERZA Y CABLEADO EXISTENTE**

El tablero de fuerza es accesible, posee una buena ventilación y la distribución de sus componentes facilita las tareas de mantenimiento por lo cual se debe mantener su ubicación original, además, algunos de los equipos proporcionados de fábrica poseen una calidad innegable por parte del fabricante Weg, por lo que algunos componentes pueden ser utilizados para el rediseño del tablero. El cableado de fuerza por otra parte se encuentra totalmente deteriorado y en algunos casos con el aislante dañado, en el rediseño de la máquina será necesario reemplazar todo el cableado existente.

### **3.2.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ORIGINAL**

Después de revisar el diseño de fábrica del sistema de control y fuerza en el apartado anterior, notamos la existencia de algunas falencias en ambos circuitos. Los problemas encontrados en el diseño afectan la eficiencia de la máquina, hacen el que la labor de mantenimiento se vuelva difícil, los elementos de fuerza del sistema no poseen las protecciones adecuadas, el sistema es difícil de configurar y no posee un sistema de control centralizado.

El sistema de alineación de material debe ser reemplazado en su totalidad, la tarjeta electrónica compuesta de la fuente y el puente h inversor no funcionan, el motor DC existente posee además un pequeño circuito de control el cual está totalmente deteriorado y funciona parcialmente. El sistema original, trata de dividir cada una de las tareas necesarias del sistema mediante su sistema modular de control, sin embargo, al

dividir las tareas la complejidad para operar y configurar la máquina también aumenta, en caso de una falla es necesario la revisión de cada módulo individualmente. Para corregir los problemas se debe reemplazar el hardware existente en su totalidad, además de reemplazar el cableado existente. Este proceso se realizara en tres pasos:

1. Diseño de un nuevo sistema de control
2. Diseño del nuevo tablero de fuerza
3. Implementación

El rediseño de cada uno de los sistemas debe ser ajustado a las necesidades de la empresa y también deberá mantener las condiciones adecuadas de seguridad y operatividad.

### **3.3 DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA**

#### **3.3.1 LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE CONTROL**

Una vez que se revisan los problemas del sistema original de la rebobinadora, es necesario plantear soluciones idóneas para mejorar la operación y eficiencia de la máquina. Los problemas listados en el apartado anterior pueden solucionarse mediante la implementación de un sistema basado en un controlador lógico programable capaz de agrupar el conjunto de sensores y señales de control, con el fin de corregir los problemas de hardware descentralizado existentes así también como para mejorar la labor de mantenimiento de la máquina.

El hardware de este PLC a colocar debe poseer una o varias entradas configurables como contadores rápidos (HSC, High speed counter) las cuales son necesarias para conectar un sensor de realimentación como un encoder o un sensor inductivo de buena respuesta y alta tasa de conmutación. Además el equipo a utilizar deberá ser capaz de manejar salidas analógicas sean estas de corriente 4 - 20mA o voltaje 0 - 10 Vdc para el control de los variadores de frecuencia.

El controlador a seleccionar deberá poseer un puerto de comunicaciones para su configuración y acople de interfases de operación cuyo propósito será disminuir y si es posible eliminar la dificultad de supervisión e identificación de fallas, se propone la instalación de un sistema de monitoreo táctil el cual mostrará todos los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento de la máquina, el sistema deberá también poseer un puerto de comunicaciones compatible con el controlador a seleccionar.

El cableado de control y fuerza deberá ser reemplazado y dimensionado de acuerdo a los elementos de fuerza o control a manejar. Todo el cableado existente deberá ser agrupado en ductos apropiados para asegurar su durabilidad y evitar accidentes debido a problemas con las chaquetas de los conductores. Se deberán dimensionar y montar los sistemas de protección adecuados para la protección de los elementos críticos del sistema de control y de fuerza.

### **3.3.2 DISEÑO DE LA NUEVA ARQUITECTURA DEL SISTEMA**

En los apartados anteriores se detallan los problemas existentes en el sistema original, estos se presentan en la parte de hardware así también como en la parte de operación de la máquina.

Los principales problemas presentes son los siguientes:

1. Hardware descentralizado de difícil configuración.
2. Hardware descentralizado de difícil revisión en tareas de mantenimiento.
3. Hardware de difícil reemplazo en caso de mal funcionamiento.
4. Falta de soporte debido a discontinuación de la máquina.
5. Sistema difícil de monitorear y supervisar.
6. Cableado en mal estado

Con el fin de solucionar cada uno de estos inconvenientes, se procedió a crear un nuevo sistema de control y fuerza, en la figura 3.13 a continuación se muestra la distribución de la nueva arquitectura del sistema de control.

Se ha dejado atrás el sistema modular existente para dar paso a un sistema centralizado basado en un PLC, se observa además una pantalla táctil HMI con el fin de facilitar las tareas de mantenimiento y supervisión del sistema.

La nueva arquitectura está basada en comunicaciones Ethernet, se ha colocado un switch industrial con el fin de facilitar las tareas de programación y conexión del sistema.

El controlador existente estará en la capacidad de monitorear todas las señales digitales provenientes de los sensores, además deberá poseer en su hardware y en su software un conjunto capaz de realizar el conteo rápido de pulsos HSC. En la figura 3,13 se muestran conectados al PLC los sensores fotoeléctricos y sensores inductivos existentes. En el grupo de sensores tenemos además dos finales de carrera que limitarán

el recorrido del tornillo sin fin del alineador de material para proteger de daños al reductor y al sistema mecánico existente.

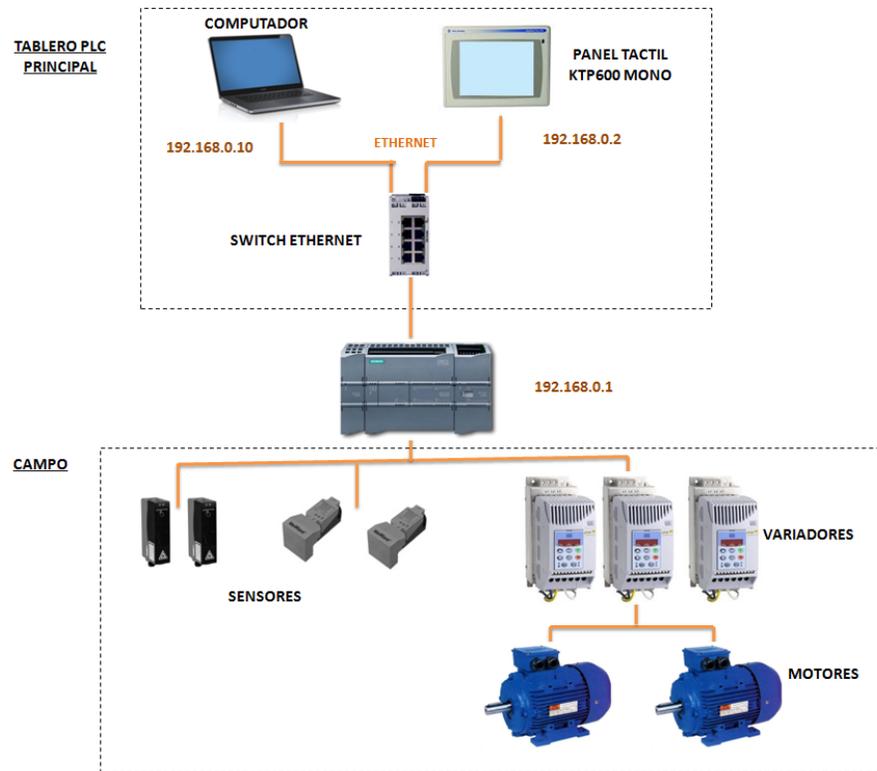
El control de los variadores de velocidad será realizado mediante señales analógicas de voltaje 0 - 10 Vdc, las señales serán enviadas mediante el controlador luego de realizado el proceso de cálculo en las instrucciones programadas, los variadores de velocidad a su vez regularán la velocidad, frecuencia y corriente de salida de los motores.

Además se agrupan los equipos en dos tableros diferentes ya que el espacio disponible en el tablero original no es suficiente para albergar todo el cableado y equipos:

- Tablero de control (Principal).
- Tablero de fuerza y control de motores.

En el tablero de control se agruparán todas las señales de control que corresponden a las entradas del sistema, también se agruparán todas las señales de salida, como medida de protección las salidas serán cableadas hacia relés auxiliares con el fin de proteger el controlador contra una conexión inadecuada o sobrecarga.

En el tablero de fuerza y motores se colocarán todos los elementos de protección del sistema, transformador, contactores, variadores de frecuencia y bornes de fuerza para los motores existentes. En la figura 3.13 se puede apreciar la nueva arquitectura que tendrá el sistema basado en un controlador, se observan las diferentes direcciones IP asignadas a cada dispositivo.



**Figura3. 13** Arquitectura del nuevo sistema de control

### 3.3.3 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

De acuerdo al análisis del sistema en los apartados anteriores el controlador a seleccionar debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Poseer entradas y salidas suficientes para integrar todas las funciones de la máquina existentes.
2. Poseer integrado en su hardware al menos dos entradas (HSC).
3. Estructura Modular expandible.
4. Debe poseer de manera integrada o como módulo de expansión salidas analógicas (0-10Vdc).

5. Poseer un puerto Ethernet de comunicaciones.

En el tabla 3.1 a continuación se muestra el detalle de las entradas consideradas para llevar a cabo el proceso de creación del sistema de control de la máquina.

**Tabla 3. 1** Detalle entradas necesarias

<b>ENTRADAS</b>		
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>TIPO</b>
1	Pulsante Arranque general de máquina	Digital 24 Vdc
2	Pulsante tipo hongo Paro de máquina	Digital 24 Vdc
3	Pulsante Jog forward motor rebobinador 1	Digital 24 Vdc
4	Pulsante Jog reverse motor rebobinador 1	Digital 24 Vdc
5	Pulsante Jog forward motor rebobinador 2	Digital 24 Vdc
6	Pulsante Jog reverse motor rebobinador 2	Digital 24 Vdc
7	Pulsante Jog Left alineador	Digital 24 Vdc
8	Pulsante Jog right alineador	Digital 24 Vdc
9	Sensor Fotoelectrico alineador	Digital 24 Vdc
10	Encoder o inductivo canal contador	HSC 24Vdc
11	Encoder o inductivo canal dirección	HSC 24Vdc
12	Final de carrera 01 alineador	Digital 24 Vdc
13	Final de carrera 02 alineador	Digital 24 Vdc

**Tabla 3. 2** Detalle salidas necesarias.

<b>SALIDAS</b>		
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>TIPO</b>
1	Forward Variador frecuencia rebobinador 1	Digital 24 Vdc
2	Reverse Variador frecuencia rebobinador 1	Digital 24 Vdc
3	Forward Variador frecuencia rebobinador 2	Digital 24 Vdc
4	Reverse Variador frecuencia rebobinador 2	Digital 24 Vdc
5	Forward Variador frecuencia desbobinador	Digital 24 Vdc
6	Reverse Variador frecuencia desbobinador	Digital 24 Vdc
7	Forward Variador frecuencia alineador	Digital 24 Vdc
8	Reverse Variador frecuencia alineador	Digital 24 Vdc
9	Luz Falla	Digital 24 Vdc
10	Referencia analógica Variador 01	0-10 Vdc
11	Referencia analógica Variador 02	0-10 Vdc
12	Referencia analógica Variador 03	0-10 Vdc

El controlador a seleccionar deberá manejar un total de 10 entradas digitales a 24Vdc, tiene que manejar dos entradas destinadas al funcionamiento del contador rápido HSC, 9 salidas digitales a 24 Vdc y un total de 3 señales analógicas para envío de la referencia de velocidad hacia los variadores.

### 3.4 CONTROLADORES LÓGICOS COMERCIALES

Una vez dimensionada la cantidad de entradas, salidas y funciones especiales necesarias es posible presentar las opciones disponibles en el mercado, se deben considerar el software necesario para la programación de los dispositivos. Cabe recalcar que algunos fabricantes presentan mejores opciones cuando se adquiere el dispositivo en conjunto con el paquete de software, lo cual es un punto a favor del fabricante que presenta esta opción.

**Tabla 3. 3** Comparativa controladores comerciales Allen Bradley-Siemens

MODELO	COMM	EXPANSION	MEM	PUERTO HSC
Allen Bradley MicroLogix™ 1100 1763	Eth, RS232	4 módulos, 10 entradas incorporadas	4KB	no
Allen Bradley MicroLogix 1200 1762	Eth, RS232	6 módulos, 24 entradas incorporadas	4KB	1
Allen Bradley MicroLogix™ 1400 1766	Eth, RS232	7 módulos, 20 entradas incorporadas	10 KB	6
Siemens - S7 1200 1212C	Eth	6 módulos, 14 entradas incorporadas	10 KB	4
Siemens -S7 1200 1214C	Eth	8 módulos, 14 entradas incorporadas	10 KB	6

Observando las opciones que muestra la tabla 3.3, podemos tomar como opciones funcionales los modelos Micrologix 1400 de Allen Bradley y como otra de las opciones tomaremos al S7-1200 1214C de Siemens. Es necesario comparar las especificaciones de los dispositivos para seleccionar la mejor opción considerando además factores como el costo y disponibilidad de los equipos. Se pueden revisar las características de cada uno de los dispositivos en las paginas web correspondientes al fabricante:

Para controladores Allen Bradley

[www.ab.com](http://www.ab.com)

Para controladores Siemens

[www.siemens.com](http://www.siemens.com)

### **3.4.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR**

Una vez que hemos analizado las características de cada uno de los controladores, podemos observar que el equipo que ofrece las mejores características es el de la marca Allen Bradley. Sin embargo no basta con seleccionar el controlador basado en este aspecto ya que cada uno de los controladores además deberá poseer la plataforma de software de programación cuyo coste no sea excesivo, deberá estar disponible en el menor tiempo posible por parte del distribuidor y deberá tener conectividad adecuada para la pantalla táctil a seleccionar.

Una vez contactado el distribuidor también es necesario consultar si existen paquetes que agrupen todo lo necesario: software, equipos, licencias. El distribuidor

autorizado de la marca Allen Bradley no posee paquetes como los mencionados anteriormente, posee tiempos de entrega largos debido a la importación directa de los equipos y módulos deseados, el proceso tarda aproximadamente 4-8 semanas. El panel táctil de la marca es de igual manera costoso con la única ventaja que posee un cliente web de programación incorporado lo que reduciría los costes de adquirir un software para el propósito de configuración del dispositivo.

El software de programación para el controlador deberá ser adquirido por separado junto con la licencia del programa. En la figura 3.14 se puede observar uno de los paneles táctiles de la marca Allen Bradley serie "Component" con su respectivo software de programación.



**Figura3. 14** Panel View Component C600

Por otra parte tenemos al distribuidor Siemens, observamos que esta marca tiene muy buena participación y comercialización de sus productos en el país, muchos de los equipos los encontramos directamente en stock en cualquier integrador autorizado y a un precio sumamente inferior que la competencia. El tiempo de entrega de los equipos es

inmediato, solo se requiere emitir la orden de compra pertinente y retirar el producto. En la plataforma S7-1200, además, se comercializan paquetes que incluyen software de programación del controlador, panel táctil serie KTP600 mono, software de programación del panel y el controlador.

El paquete del controlador además incluye una fuente de 24Vdc para energizar el PLC y que servirá además para energizar los sensores existentes. Este último punto es de vital importancia en la selección ya que reduce costes de equipos y software sin sacrificar calidad y rendimiento de los equipos.

Es así que la plataforma de Siemens se convierte en la opción idónea para la realización de este proyecto. Se puede observar el conjunto comercial Siemens que consta del software, PLC, panel Táctil y fuente de alimentación en la figura 3.15.



**Figura3. 15** Paquete Siemens S7-1200 KTP600 y software de programación

---

### **3.5 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE PROTECCIONES PARA LOS EQUIPOS EXISTENTES EN EL TABLERO DE CONTROL**

Es necesario proteger el sistema de control contra sobrecargas y cortocircuitos, para llevar a cabo este fin se utilizaran disyuntores, un transformador de aislamiento-reducción de voltaje, y además se utilizaran relés auxiliares para evitar daños en las salidas del controlador a utilizar.

La fuente adquirida posee las siguientes características:

- Salida 22 - 24Vdc regulables 2.5A
- Protección contra cortocircuitos y sobrecargas
- Rango de frecuencias de entrada 47-63Hz
- Salida de voltaje totalmente regulada
- Alta eficiencia
- Potenciómetro de variación de salida
- Protección contra picos de corriente
- Indicador Led
- Permite conexiones paralelas

Es necesario proteger la fuente de alimentación del sistemas ya que en esta se alimentan los sensores existentes y es susceptible a fallas de conexión o sobrecarga cuando se realiza el reemplazo de componentes o en mantenimiento de rutina. Se colocara un disyuntor de 2 polos 3A para proteger la fuente, además se aislara el circuito

---

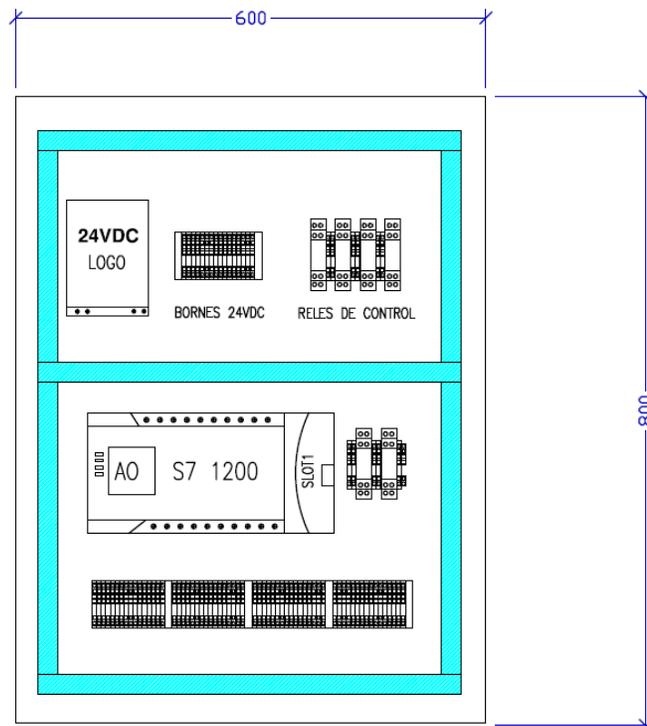
de control mediante un transformador reductor que tendrá una capacidad de 0.3[VA], el transformador y el disyuntor estará ubicado dentro del tablero de fuerza de la máquina como se ha mencionado anteriormente.

Los relés de interfase y aislamiento deberán poseer una corriente baja, sumamente menor al valor de la corriente máxima del terminal de salida del controlador. Se utilizarán relés con un consumo máximo de 25mA, poseerán por lo menos 1 contacto NA y 1 contacto NC. En el campo comercial se ubican los relés Wago los cuales cumplen con lo requerido y el modelo funcional es el 788-312 a continuación se muestran sus características:

Relé de propósito general Wago 788-312:

- Tipo de Relé: Propósito general
- Voltaje de la bobina: 24 [Vdc]
- Corriente máxima del contacto: 16 [A]
- Voltaje de los contactos: 250 [V]
- Configuración de los contactos: 1NA 1NC
- Corriente de la bobina: 19mA

Una vez planteadas y dimensionadas las protecciones del sistema de control del sistema, distribuimos los elementos con el fin de agrupar las señales y equipos a continuación en la figura 3.16 se muestra el esquema de construcción del tablero de control.



**Figura3. 16** Esquema de distribución de elementos de control

Todos los elementos se montaran sobre una riel DIN y las salidas del controlador se llevaran a bornes "cage clamp" que permiten una conexión fácil y segura mediante terminales tipo puntera para el cableado a conectar(ver figuras 3.17 y 3.18). Se pueden revisar los planos eléctricos del sistema de control y protecciones en el Anexo 1.



**Figura3. 17** Bornera wago con sistema cage clamp



**Figura3. 18** Terminales tipo pin

El resultado final del montaje y conexión de los equipo se puede apreciar en la figura 3.19 a continuación. Las conexiones de este tablero fueron realizadas mediante cable awg 18 y los sensores están conectados hacia las borneras de control mediante cable concéntrico 4x18 con el fin de proteger los conductores de las condiciones ambientales desfavorables presentes en planta. Se pueden revisar a detalle los planos eléctricos del tablero de control en las páginas 1,4 y 5 en el Anexo 1 (Planos Eléctricos).



**Figura3. 19** Tablero de control del nuevo sistema

## **3.6 DISEÑO DEL TABLERO DE FUERZA**

### **3.6.1. DIMENSIONAMIENTO DE PROTECCIONES**

El nuevo sistema de fuerza debe contar con un disyuntor principal accesible al personal técnico y operativo de la máquina, además se instalara un contactor de línea para tener control de la máquina si el disyuntor principal falla, este contactor deberá ser dimensionado de acuerdo a la corriente de consumo nominal de todos los equipos de la máquina, se tendrá control del accionamiento de este dispositivo mediante la implementación de una línea de emergencia mediante pulsadores tipo hongo y contactos de los variadores hacia el controlador.

En el caso de los componentes totalmente críticos para el correcto funcionamiento de la máquina como son los variadores de frecuencia WEG CFW-08, se debe considerar la utilización de elementos termo magnéticos, la mejor opción es colocar guarda motores tomando en cuenta la corriente de salida nominal del variador.

La protección deberá ser colocada a la entrada del variador mas no en sus terminales de salida hacia al motor como indica el fabricante.

En la tabla 3.4 se presentan los equipos existentes de la máquina, se muestran las características de voltaje, corriente y RPM de cada motor encontradas en las placas de cada dispositivo.

**Tabla 3. 4** Listado de equipos

ITEM	VOLTAJE	CORRIENTE	RPM	DESCRIPCION
<b>M01</b>	220/360	15/8.7 A	1760	Motor Desbobinador
<b>M02</b>	220/360/460	14/8.11/7 A	1715	Motor Rebobinador 1
<b>M03</b>	220	13.6 A	1715	Motor Rebobinador 2
<b>M04</b>	220	2.6	1700	Ventilacion Forzada
<b>M05</b>	220	1.2	1730	Alineador de material
<b>PS01</b>	110/220	2.5 A	-	Fuente Control
<b>VF01</b>	220	16 A		Variador M01
<b>VF02</b>	220	16 A		variador M02
<b>VF03</b>	220	16 A		Variador M03
<b>VF04</b>	220	3.4 A		Variador alineador

Mediante este listado podemos dimensionar el disyuntor y el contactor de línea principal en la tabla 3.5 a continuación se muestra la sumatoria de las corrientes de los equipos obteniendo como resultado:

**Tabla 3. 5** Sumatoria de corrientes

ITEM	CORRIENTE
<b>M04</b>	2.6
<b>M05</b>	1.2
<b>PS01</b>	2.5
<b>VF01</b>	16
<b>VF02</b>	16
<b>VF03</b>	16
<b>VF04</b>	3.4
<b>TOTAL</b>	<b>57.7</b>

Cabe recalcar que debido al uso de los variadores de frecuencia, la corriente pico presente en el arranque directo de los motores es inexistente por lo cual se facilita la tarea de selección del disyuntor principal, además se añadirá un 5% de tolerancia al valor de corriente obtenido.

El valor del disyuntor será de 60A para un voltaje de 220 trifásico. El contactor de línea deberá tener el mismo valor que el disyuntor principal: Bobina 220 [Vac], Corriente nominal In 60 [A], montaje riel din.

Las protecciones de los variadores de 16 [A], como se menciona anteriormente deberán poseer una escala que abarque el valor nominal citado. Es así que buscando en los distribuidores comerciales encontramos guardamotors con escala de 14 a 20 [A], mediante el potenciómetro se colocara la regulación hacia los 16 [A] nominales de los equipos, además para facilitar las labores de compra de repuestos y mantenimiento se utilizaran equipos Siemens Sirius.

Se deberá proteger el variador del alineador cuya corriente nominal es de 3.4 [A], se puede utilizar un guarda motor con rango de corriente de 2.8 - 4 [A]. En la tabla a continuación observamos los equipos a utilizar en la construcción del tablero de fuerza:

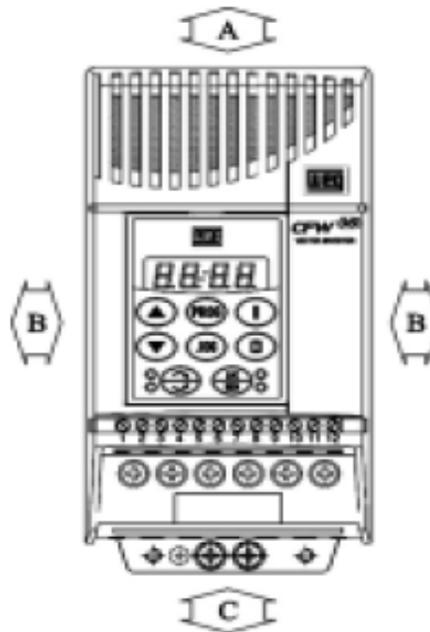
**Tabla 3. 6** Equipos necesarios para la implementación del sistema

<b>ID EQUIPO</b>	<b>CORR. NOM</b>	<b>DESCRIPCION</b>
<b>Q01</b>	62 [A]	Disyuntor principal
<b>C01</b>	72 [A]	Contactador de línea
<b>E01</b>	14-20 [A]	Protección Desbobinador
<b>E02</b>	14-20 [A]	Protección Rebobinador 01
<b>E03</b>	14-20 [A]	Protección Rebobinador 02
<b>E04</b>	2.8-4 [A]	Protección Alineador
<b>E05</b>	1.8-2.5[A]	Ventilación forzada

### 3.6.2. DISTRIBUCIÓN DEL TABLERO

Este tablero deberá poseer las características adecuadas para albergar los elementos de fuerza y protección necesarios para poner en marcha el sistema considerando el espacio y ventilación adecuada.

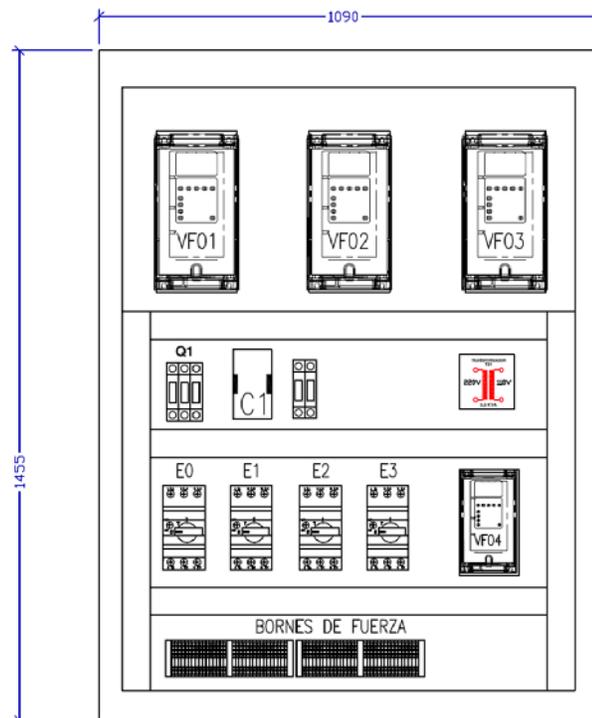
Este tablero también debe albergar a los variadores de frecuencia, es por ello que estos deben estar ubicados en un sitio estratégico del tablero con el fin de que posean una ventilación y accesibilidad adecuada. Para conocer los detalles del espacio necesario para montaje y ventilación es necesario revisar el manual de los variadores. En el manual se especifican los siguientes datos:



A: 40mm B: 30mm C: 50mm

**Figura3. 20** Instrucciones de montaje variadores WEG

Tomando en cuenta estas especificaciones montamos los variadores respetando las distancias mostradas en la figura 3.16. En la siguiente figura se muestra la distribución final del tablero de fuerza colocando además los elementos de fuerza restantes. El cableado del sistema se realiza tomando en cuenta las corrientes nominales de los equipos, en el caso de los variadores de frecuencia su consumo nominal de corriente es de 16 [A], por lo cual en este caso se utilizará cable concéntrico 4x12 AWG, el consumo total del sistema es de 60 [A] nominales, por lo cual será necesario utilizar para la acometida del sistema cableado 8 AWG, en el caso de los motores pequeños cuyo consumo no excede los 4[A] se utilizó cableado concéntrico 4x18.



**Figura3. 21** Esquema de montaje del tablero de fuerza

En la figura 3.22 a continuación se muestra el resultado final del montaje de los elementos en el tablero de fuerza. En la figura 3.23 se puede observar el resultado del tendido de cable hacia los motores existentes.



**Figura3. 22** Tablero de Fuerza del nuevo sistema



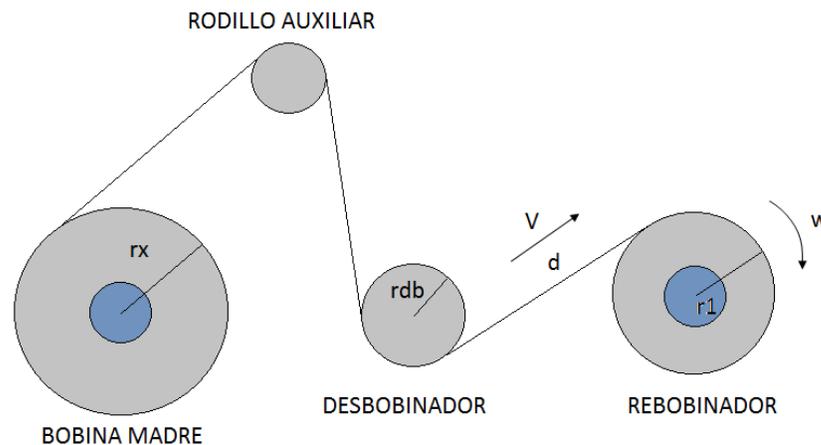
**Figura3. 23** Tablero de Motores readecuado

En el Anexo 1 (Planos Eléctricos), páginas 6 hasta 11, se pueden revisar a detalle los planos eléctricos del sistema de fuerza.

### 3.7 DESARROLLO DEL SOFTWARE

#### 3.7.1 FUNDAMENTOS PARA CREAR EL ALGORITMO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE LA MÁQUINA

La máquina rebobinadora como se ha mencionando en capítulos anteriores posee varios rodillos cuyo movimiento se produce mediante los motores con sus respectivos sistemas de acople y reducción. En este capítulo se analizara el comportamiento que debe tener la máquina con el fin de desarrollar el algoritmo que funcionara en el controlador. En la figura 3.24 se observa un esquema del funcionamiento de la máquina se observan además la dirección del movimiento y cada uno de los rodillos involucrados en el proceso de rebobinado.

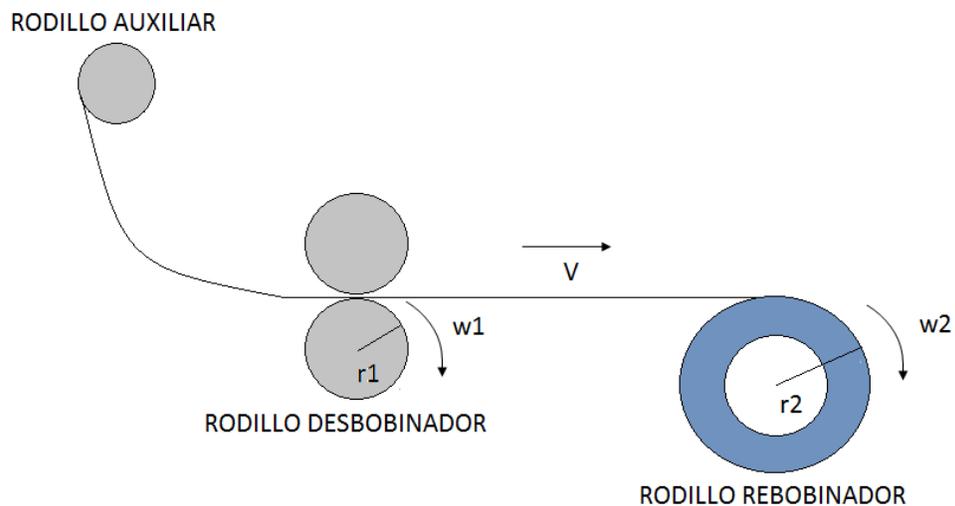


**Figura3. 24** Esquema de funcionamiento del proceso de rebobinado

La bobina madre a tratar será desbobinada mediante el rodillo de radio constante  $r_{db}$ , este rodillo girara a una velocidad " $w_{rdb}$ " e impondrá una velocidad lineal constante para el arrastre del material.

Cada vuelta completa del rodillo desbobinador expulsara una longitud  $d$  del material equivalente a su perímetro . El rodillo rebobinador deberá recoger esta cantidad de material a la misma velocidad lineal pero a diferencia del rodillo desbobinador, el radio  $r_1$  de este rodillo es variable y totalmente dependiente de las características del material a procesar. La característica más importante es el espesor del material ya que de él depende la variación del diámetro de la bobina en el rebobinador. Cada vuelta que da el rebobinador aumenta el radio de la bobina en función del espesor del material en " $r_1 + (\text{espesor} * \text{numero de vueltas})$ ".

### 3.7.2 CÁLCULO DEL SETPOINT DE VELOCIDAD DEL REBOBINADOR



**Figura3. 25** Esquema funcionamiento del rebobinador

En la Figura 3.25 se observa la distribución de los rodillos desbobinador y rebobinador tal cual se encuentra montado en la máquina, el radio del rodillo desbobinador y el radio del rodillo rebobinador es igual. En cualquier instante de tiempo se cumple que la velocidad angular de los rodillos es la siguiente:

Para el rodillo desbobinador en cualquier instante de tiempo la velocidad angular es:

$$\omega_1 = \frac{v}{r_1} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

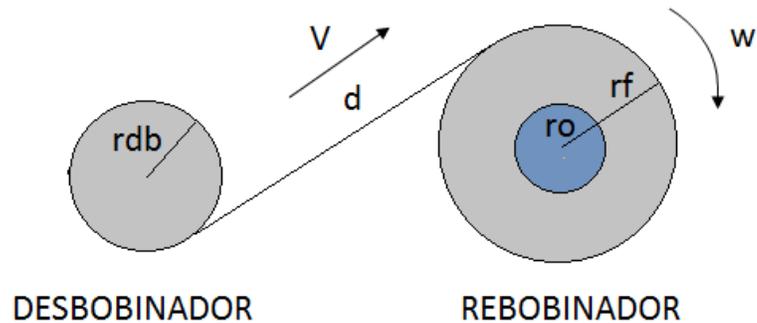
Donde  $V$  es el setpoint de máquina ingresado por el operador y  $r_1$  es el radio del rodillo. Para el rodillo rebobinador tendremos que:

$$\omega_2 = \frac{v}{r_2 + \Delta r_2} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Siendo

$$\Delta r_2 = N * e \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde  $N$  es el número de vueltas que da el rodillo y " $e$ " es el espesor del material a procesar. El número de vueltas será contabilizado por un conjunto de dos sensores inductivos conectados al HSC (Contador rápido de pulsos) en el controlador. El espesor de material deberá ser ingresado mediante el panel táctil, HMI, por el operador. El control de la máquina se realizará con setpoints de velocidad por lo cual debemos encontrar el valor a enviar a la salida analógica del controlador en relación a la velocidad de máquina ingresada por el operador de la rebobinadora.



**Figura3. 26** Radio interno y externo rebobinador en t diferente de 0

La velocidad de trabajo se medirá en el rodillo del rebobinador por lo tanto se realizara el control de velocidad en referencia a este punto. El valor a obtener será la velocidad lineal de máquina multiplicada por un factor a obtener para mantener la misma velocidad en el rebobinador con radio variable. En la Figura 3.26, observamos que se cumplen las siguientes igualdades:

- Velocidad angular rodillo interno:

$$\omega_o = \frac{V_x}{r_o} \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

- Velocidad angular bobina externa:

$$\omega_f = \frac{V_f}{r_f} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

La velocidad angular del rodillo interno como la bobina externa son iguales en todo instante de tiempo, sin embargo sus velocidades lineales difieren. Como la referencia de velocidad a dar al rodillo rebobinador es en función de la velocidad lineal de máquina

igualamos las ecuaciones 3.4 y 3.5 para obtener  $V_x$  en función de la variación del radio del material en proceso y del setpoint de velocidad ingresado.

$$\omega_o = \omega_f = \frac{V_x}{r_o} = \frac{V_f}{r_f} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

De la igualdad anterior obtenemos:

$$V_x = V_f * \frac{r_o}{r_f} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

En la ecuación x tenemos la velocidad a la que debe girar el rodillo interno del rebobinador para mantener la velocidad lineal de máquina. Además si observamos la figura x en paginas anteriores tenemos que:

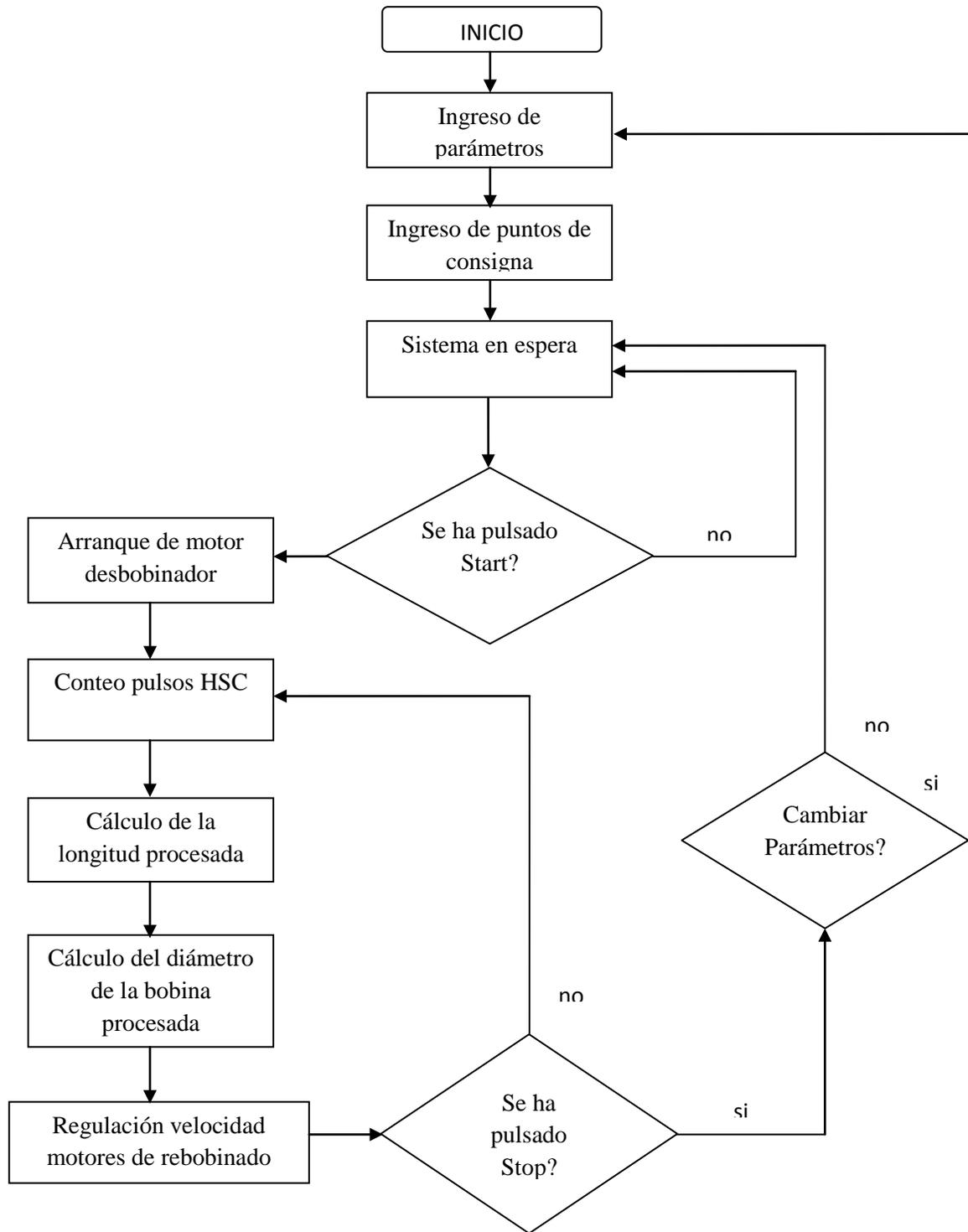
$$r_f = r_2 + \Delta r_2 \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Y que:  $\Delta r_2 = N * e$

$$V_x = V_f * \frac{r_o}{r_2 + (N * e)} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

Por lo tanto tenemos que el setpoint de velocidad del rodillo rebobinador esta dado por la ecuación 3.9, en función de las variables conocidas.

Una vez que conocemos el comportamiento físico de la máquina al igual que los fundamentos básicos del cálculo del diámetro podemos proceder a crear el programa de control. Se ha generado el algoritmo de funcionamiento el cual se detalla a continuación en el diagrama de flujo de la figura 3.27 a continuación.



**Figura3. 27** Diagrama de flujo proceso de rebobinado

El diagrama de flujo de la figura 3.27 describe el proceso a realizar para configurar correctamente la máquina, el primer paso es configurar las características de velocidad de máquina e introducir los parámetros de la bobina a cargar. Luego mediante el pulsante de arranque de la máquina se procederá a iniciar el proceso. Cuando el proceso se ha iniciado, el controlador realizará los cálculos correspondientes con el fin de regular la velocidad en función del diámetro y longitud del material.

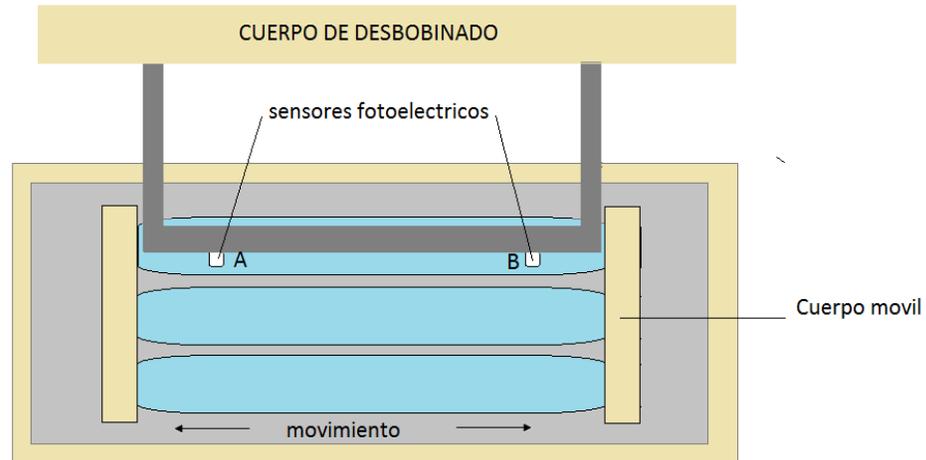
Para realizar la configuración del PLC utilizaremos el software TIA PORTAL V10.5, este software nos permite configurar de manera fácil el controlador y el HMI.

En el Anexo 2 se puede ubicar el manual de usuario el cuál ilustra la forma de operar correctamente la máquina.

### **3.7.3 FUNDAMENTO LÓGICO PARA EL ALINEADOR DE MATERIAL**

El funcionamiento de este sistema es sencillo, y está basado en sensores fotoeléctricos para la detección de la película como se indica en la figura 3.25, los sensores fotoeléctricos existentes miden diferencia de contraste entre dos áreas diferentes, la película y el fondo o color del rodillo auxiliar de desbobinado.

Los sensores se encuentran montados sobre un soporte metálico ubicado a 3 cm de altura con referencia del rodillo auxiliar de desbobinado. El rodillo de desbobinado debe ser de preferencia de color negro para tener una detección precisa.



**Figura3. 28** Esquema sistema de alineamiento

Los sensores fotoeléctricos determinan como debe estar alineado el material y en el caso de que el material salga de rango, el sistema variador, motor, reductor colocara la película dentro de los limites de trabajo.

El conjunto de los dos sensores marcara cuatro posibilidades para el movimiento del alineador hacia uno de los lados. A continuación se presenta la tabla 3.7 detallando cada una de las opciones:

**Tabla 3. 7** Posibles combinaciones de detección sensores fotoeléctricos

SENSOR A	SENSOR B	IZQUIERDA	DERECHA
<b>ENCENDIDO</b>	<b>ENCENDIDO</b>	APAGADO	APAGADO
<b>ENCENDIDO</b>	APAGADO	APAGADO	ENCENDIDO
<b>APAGADO</b>	<b>ENCENDIDO</b>	ENCENDIDO	APAGADO
<b>APAGADO</b>	APAGADO	APAGADO	APAGADO

Observamos en la tabla 3.7 que en la última combinación no es posible determinar si el material continua en la bobinadora, es posible que haya existido una rotura del material o a su vez que el mismo se encogiera hacia el centro del rodillo guía, es por ello que el algoritmo en este caso detendrá el proceso de alineamiento y enviará una alarma que se visualizara en el HMI.

Es necesario implementar un filtrado para la lectura de las señales de los sensores fotoeléctricos para evitar falsos accionamientos del variador del motor de alineación.

### **3.8 INTERFAZ DE OPERACIÓN**

Con el fin de solucionar los problemas existentes en el sistema original de control, se ha instalado una pantalla Siemens KTP 600 monocromática, para realizar tareas de configuración, supervisión y gestión de mantenimiento del sistema. Se ha creado un conjunto de 6 pantallas organizadas de la siguiente forma:

- Supervisión modo automático.
- Supervisión modo manual.
- Calibración-carga de material.
- Gestión de mantenimiento
- Alarmas
- Ayuda del sistema

Se podrá navegar por cada una de las pantallas mediante los botones de función presentes en el panel frontal de la pantalla táctil.

### 3.8.1 PANTALLA SUPERVISIÒN

La pantalla principal fue diseñada con el fin de facilitar las tareas de supervisión del personal, en ella se mostrarán en tiempo real las variables del proceso, parámetros de configuración y estados de la máquina .

Se ha dividido la pantalla de supervisión en secciones con el fin de mostrar toda la información posible sin saturar la pantalla como se muestra en la figura 3.29



**Figura3. 29** Secciones de la pantalla de supervisión

En la sección número uno, se muestran las variables del proceso, se puede definir la sección número uno como de supervisión. En la sección número dos, se muestra el estado de la máquina, en este espacio se pueden visualizar si existe algún problema en el estado de los variadores, el estado del alineador del material o en los motores, además en este espacio se mostrará si se han cumplido o no las labores de mantenimiento programadas en la pantalla de gestión de mantenimiento preventivo(ver figura 3.30).



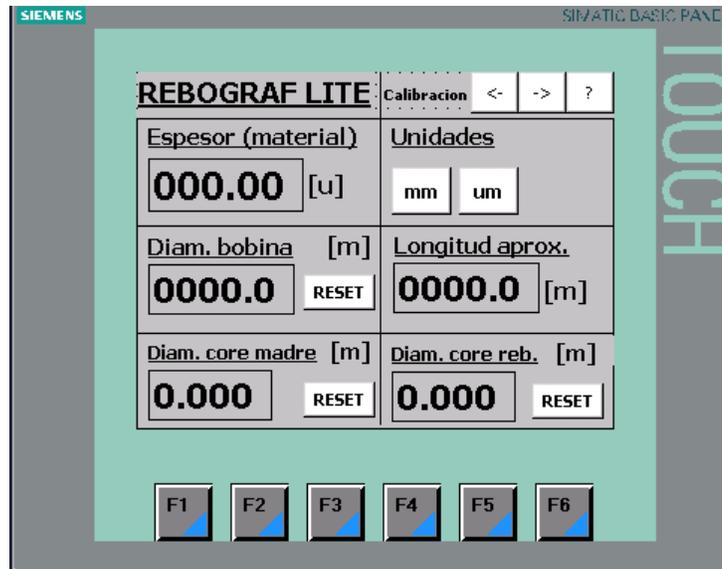
**Figura3. 30** Pantalla de supervisión con problemas de mantenimiento

En la sección número tres, se encuentran todos los parámetros modificables como puntos de consigna o ajustes finos de tensión (sólo modo manual), el operador podrá realizar cambios fácilmente en estos parámetros con el fin de obtener el producto deseado y manipular la tensión según la receta de cada material.

### 3.8.2 PANTALLA DE CALIBRACIÓN Y CARGA

En esta pantalla se podrán ingresar los datos del material a procesar como son el espesor de la película de polipropileno, el diámetro del núcleo de cartón (core) de la bonina madre, el diámetro del núcleo de cartón del rebobinador.

Además la pantalla permite al operador seleccionar las unidades de trabajo del material sean estas en milímetros para los materiales más gruesos o micras para los materiales más finos. En la figura 3.28 se puede apreciar la pantalla de carga y calibración.



**Figura3. 31** Pantalla de calibración y carga

Esta pantalla es útil además para cargar una bobina en la cual se ha producido pérdida del material debido a rotura de la película, si se remueve material de la bobina rebobinada, el operador podrá ingresar el diámetro final de la bobina luego del proceso correctivo pertinente.

### 3.8.3 PANTALLA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

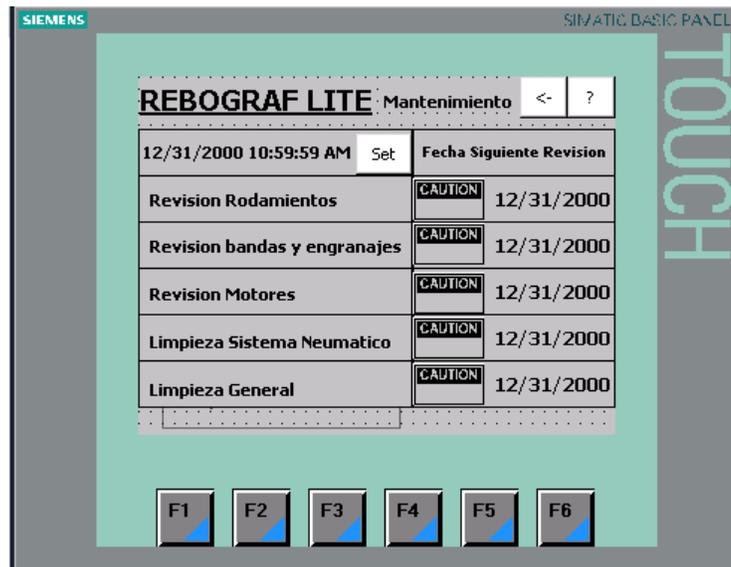
En la pantalla de mantenimiento preventivo, el personal de mantenimiento estará en la capacidad de gestionar las rutinas de mantenimiento preventivo mediante fechas fijadas para los mismos.

Se han considerado los elementos mecánicos y electromecánicos más importantes:

- Sistemas de rodamientos
- Bandas y engranajes.

- Revisión eléctrica y mecánica motores.
- Limpieza y revisión del sistema neumático.
- Limpieza general (incluye tableros de control)

La pantalla además mostrará si alguno de los ítems de mantenimiento no se ha cumplido correctamente mediante un aviso sonoro.



**Figura3. 32** Pantalla de mantenimiento preventivo

### 3.8.4 PROGRAMACIÓN DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA

Los variadores de frecuencia WEG - CFW08 existentes deben ser configurados para ser puestos en marcha y controlados remotamente mediante la salida analógica del controlador Siemens S7-1200. Cada variador posee un conjunto de 500 parámetros de programación los cuales se encuentran separados en grupos según su aplicación es así que tenemos:

---

- **P000 - P099 (parámetros de acceso y lectura):** este grupo permite seleccionar el modo de edición de parámetros y además permite seleccionar la variable a visualizar cuando el variador empieza a funcionar. Los principales parámetros a visualizar son: Frecuencia de salida, Corriente de Salida, RPM, Torque.

- **P100 - P199 (parámetros de regulación):** este grupo permite al usuario especificar si desea utilizar rampas de aceleración, desaceleración, rampa S, además permite modificar límites de seguridad en cuanto al trabajo del variador es así que podremos aumentar o disminuir los límites de parámetros como: voltaje máximo del bus dc del circuito intermedio, corriente máxima de salida del convertidor, compensación por resbalamiento.

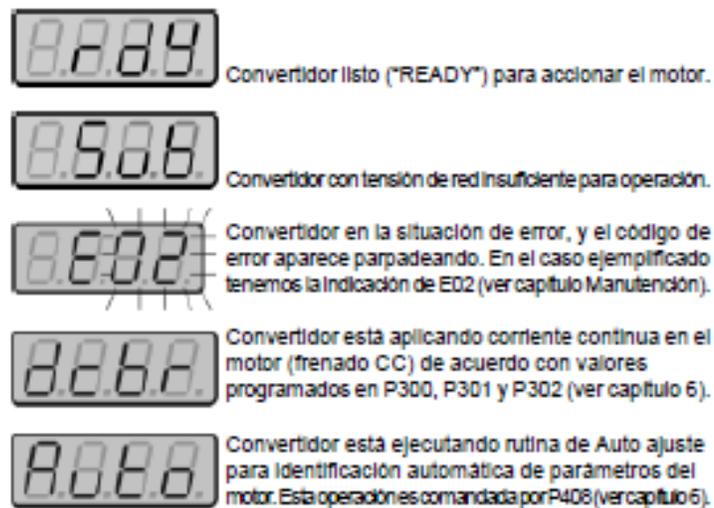
- **P200 - P398 (parámetros de configuración):** este grupo posee parámetros muy importantes para la puesta en marcha de los equipos, el usuario podrá configurar el tipo de control a utilizar: escalar, cuadrático, o vectorial según la aplicación. En este grupo además se puede especificar de donde se tomara la referencia de velocidad para el variador, teniendo como opciones local, remoto o mediante comunicación 485. También es posible configurar las entradas y salidas analógicas del variador.

- **P399 - P499 (parámetros del motor):** en este grupo se ingresan los datos de placa del motor, es posible realizar un autoajuste en caso de no tener datos en placa en el motor a poner en marcha. Todos los ajustes en el convertidor son indicados en el display y se muestran con la letra P seguida de un número como se indica en la figura 3.33.



**Figura3. 33** Display mostrando un parámetro

A cada parámetro se ha asociado un valor numérico que corresponde a la opción seleccionada entre las disponibles. Para alterar el valor de cualquier parámetro es necesario activar el modo edición modificando el valor del parámetro P000 = 5. En la figura 3.34 se muestran los estados del display del variador.



**Figura3. 34** Display del convertidor WEG CFW-08

Es necesario colocar los parámetros de fábrica ya que los variadores han sido manipulados en ocasiones anteriores por el personal de mantenimiento y parametrizar los variadores desde este punto.

A continuación se presenta la tabla 3.8 en la que se muestra la descripción y valor de los parámetros modificados para la puesta en marcha de la rebobinadora se indican los valores para cada uno de los variadores.

**Tabla 3. 8** Parámetros funcionamiento Variadores WEG CFW-08

PARAMETRO	VF01	VF02	VF03	DESCRIPCION
<b>P204</b>	5	5	5	Restaurar ajustes de fábrica
<b>P000</b>	5	5	5	Habilitar el modo edición
<b>P100</b>	3	3	3	Rampa de aceleración en segundos
<b>P101</b>	5	5	5	Rampa de desaceleración en segundos
<b>P202</b>	2	2	2	Tipo de control (2 Vectorial)
<b>P220</b>	2	2	2	Fuente del control (2 Remoto)
<b>P221</b>	1	1	1	Fuente de la referencia de velocidad (1 Entrada analógica)
<b>P229</b>	0	0	0	Comandos modo local (1 vía bornes xc1)
<b>P230</b>	1	1	1	Comandos modo local (1 vía bornes xc1)
<b>P277</b>	5	5	5	Relé RL1 interno configurado como indicador de falla
<b>P400</b>	220	220	220	Tension nominal del motor
<b>P401</b>	15	14	13.6	Corriente nominal del motor
<b>P402</b>	1760	1715	1730	RPM nominal del motor
<b>P403</b>	60	60	60	Frecuencia nominal de trabajo

## **CAPÍTULO 4**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

#### **4.1 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL DE LOS VARIADORES**

En este capítulo se evaluará el desempeño del nuevo sistema de control y fuerza para la rebobinadora Rebograf Lite 1200, es necesario evaluar los diferentes componentes instalados para garantizar el funcionamiento de la máquina. Los variadores de frecuencia se encuentran controlados mediante relés auxiliares conectados a las salidas digitales del

controlador Siemens S7-1200, la referencia de velocidad es enviada mediante cableado directo hacia la entrada analógica del variador de velocidad. Para comprobar el funcionamiento de cada variador se realizaron pruebas de accionamiento de cada motor mediante los pulsantes de modo manual instalados en el panel frontal de la máquina. Se miden los voltajes existentes en la bobina de accionamiento de cada variador, así también se tomaran medidas de la salida analógica hacia el variador. Con este procedimiento se asegurara que los elementos se encuentran correctamente conectados y funcionarán con normalidad durante el proceso. La salida analógica hacia cada variador se encuentra escalada de manera lineal en el controlador y se encuentra en el rango de 0 - 27000, siendo 0 equivalente a 0 [Vdc] y 27000 equivalente a 10 [Vdc]. Para comprobar el estado de las salidas analógicas se realizaron mediciones de la salida variando el valor en los rangos anteriormente mencionados. En la tabla 4.1 se muestran los resultados de las pruebas realizadas en las salidas analógicas hacia los diferentes variadores.

**Tabla 4. 1** Resultados pruebas del sistema electrónico

<b>Dato</b>	<b>Teórico [Vdc]</b>	<b>AI VF01 [Vdc]</b>	<b>AI VF02 [Vdc]</b>	<b>AI VF03 [Vdc]</b>
<b>0</b>	0	0	0	0
<b>2000</b>	0.74	0.77	0.79	0.76
<b>4000</b>	1.48	1.52	1.54	1.50
<b>6000</b>	2.22	2.25	2.27	2.24
<b>8000</b>	2.96	3.01	3.03	2.98
<b>10000</b>	3.7	3.78	3.80	3.72
<b>g12000</b>	4.44	4.49	4.51	4.46
<b>14000</b>	5.18	5.22	5.24	5.20
<b>16000</b>	5.92	6.01	6.03	5.94
<b>18000</b>	6.66	6.71	6.73	6.68
<b>20000</b>	7.4	7.49	7.51	7.42
<b>22000</b>	8.14	8.19	8.21	8.16
<b>24000</b>	8.88	8.97	8.99	8.90
<b>26000</b>	9.62	9.71	9.73	9.64
<b>27000</b>	10	9.91	9.93	10.02

Observando los resultados de la tabla 4.1 podemos asegurar que las salidas analógicas del controlador funcionan perfectamente y que el cableado tendido hacia los variadores no presenta ningún inconveniente, también se a podido comprobar que los terminales se encuentran conectados perfectamente.

## 4.2 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD

Una vez que se ha comprobado el correcto funcionamiento de los elementos auxiliares de control y de las salidas analógicas se realizan pruebas del sistema de control de velocidad, para este fin se realizaran mediciones en los rodillos desbobinador y rebobinadores, mediante un tacómetro digital de rueda/láser como se muestra a continuación en la figura 4.1 y variando el set point de velocidad de la máquina en el rango de funcionamiento de 0-200 [m/min]



**Figura4. 1** Tacómetro digital de rueda existente en planta.

Las especificaciones técnicas del equipo se detallan a continuación:

### Especificaciones:

Display: 5 dígitos, 18 mm (0,7 pulgadas  $\pm$ ) LCD

Rango de prueba: 2.5 ~ 99.999 RPM (m, pies / min).

Precisión: (0,05% + 1 dígito).

Tiempo de muestreo: 0,8 segundos (más de 60 RPM).

Selección de la prueba de Rango: Automático.

Memoria: El valor máximo, valor mínimo y el último valor medido.

Distancia de detección: 50 ~ 500 mm (2 ~ 20 pulgadas) (con láser).

Base: cristal de cuarzo.

Temperatura de funcionamiento: 0 ~ 50 ° CA (32 ~ 122 ° AF).

Dimensiones: aprox. 131 x 70 x 29 mm

Peso: aprox. 160 gr

Para realizar las pruebas en los rebobinadores se desactiva temporalmente el contador de pulsos con el fin de mantener la misma velocidad en todos los rodillos. Esto es necesario para verificar que en el programa del controlador se haya realizado el escalado de la salida analógica de manera correcta.

En el capítulo anterior observamos que la velocidad de los rebobinadores es:

$$Vx = Vf * \frac{ro}{rf} \quad \text{(Ecuación 3.9)}$$

y tenemos que  $ro = rf$  mientras el contador de pulsos este desactivado por lo que:

$$V_x = Vf \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

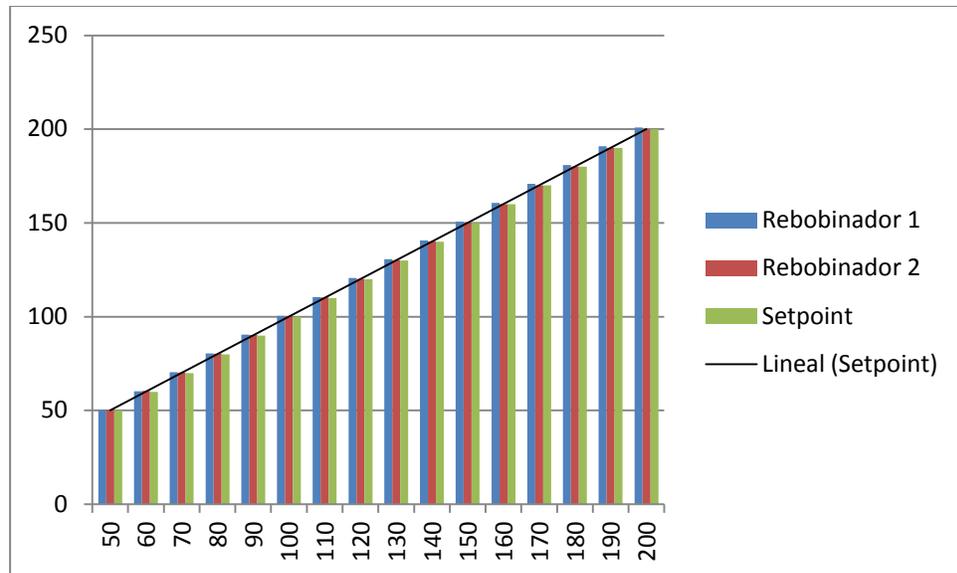
La ecuación 4.1 muestra que si se mantiene el contador desactivado las velocidades en los rodillos desbobinador y rebobinador será la misma. Con lo cual tenemos que la velocidad de los rebobinadores será exactamente igual al set point ingresado en la máquina.

En la tabla 4.2 a continuación se detallan los valores obtenidos mediante las mediciones realizadas con el tacómetro de rueda para cada set point ingresado. Este procedimiento será útil para verificar si el escalado de la salida analógica de los variadores concuerda con la velocidad de giro del motor y el set point ingresado.

**Tabla 4. 2** Resultados pruebas del sistema de control de velocidad

<b>Setpoint [m/min]</b>	<b>Rebobinador 1 [m/min]</b>	<b>Rebobinador 1 [m/min]</b>
50	50.3	50.4
60	60.34	60.37
70	70.38	70.34
80	80.42	80.31
90	90.46	90.28
100	100.5	100.25
110	110.54	110.22
120	120.58	120.19
130	130.62	130.16
140	140.66	140.13
150	150.7	150.1
160	160.74	160.07
170	170.78	170.04
180	180.82	180.01
190	190.86	189.98
200	200.9	199.95

Podemos graficar los resultados y observamos en la figura 4.2 que no existe un error significativo que afecte al control de velocidad de los motores. Por lo cual se garantiza el funcionamiento del control de velocidad y además se comprueba que el escalado realizado en el controlador está funcionando correctamente.



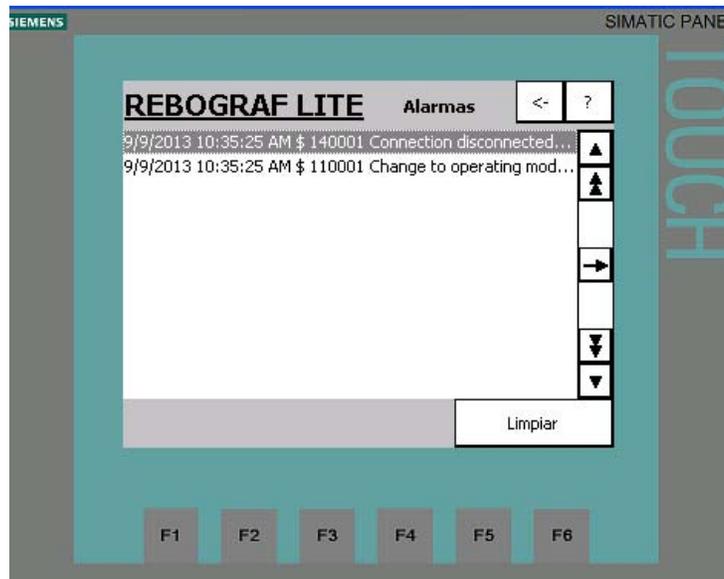
**Figura4. 2** Velocidades medidas en los rebobinadores

#### 4.4 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PANEL TÁCTIL

El panel táctil es uno de los elementos críticos para el manejo de la máquina ya que en este se colocan todos los datos del material a procesar. Este dispositivo mantiene una conexión mediante el protocolo Ethernet por lo cual al momento de pérdida de conectividad el sistema de alarmas incorporado en el panel debe estar en la capacidad de informar del problema al operador.

Para verificar el funcionamiento de la conectividad se desconectara el patch cord que conecta el panel táctil. Cuando esto suceda el panel mostrara el banner de alarmas

indicando que existe un problema con la red. En la figura 4.3 se observa el banner de alarmas indicando el estado de alarma correspondiente a pérdida de conectividad.



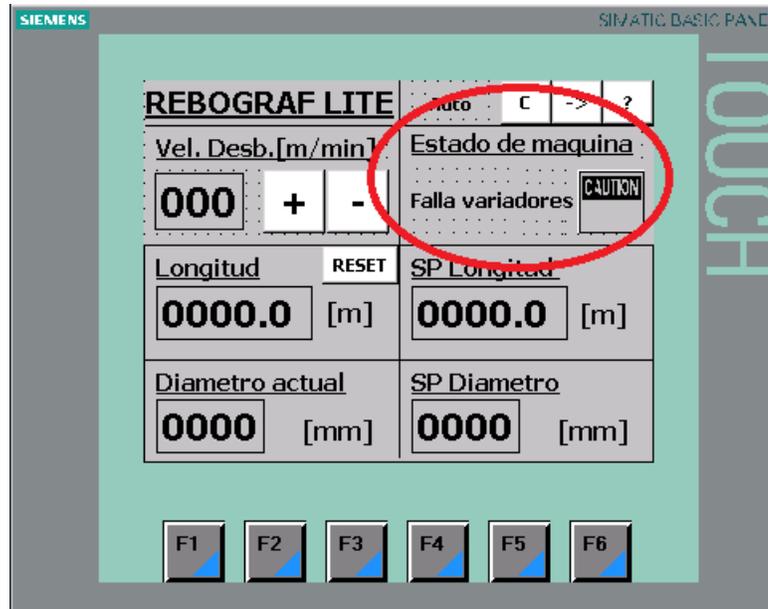
**Figura 4. 3** Banner de Alarmas mostrando estado pérdida de conectividad

El sistema además deberá mostrar estados de alarma definidos por el usuario, se han configurado los siguientes eventos de alarma:

- Falla en variadores de velocidad
- Falla en el alineador de material
- Mantenimiento preventivo no realizado

Para verificar el funcionamiento de los dos primeros estados se manipularan los elementos de protección como los guarda motores y fines de carrera con el fin de simular un estado de falla, al realizar este procedimiento el panel deberá mostrar la pantalla de alarmas configurada indicando los problemas existentes.

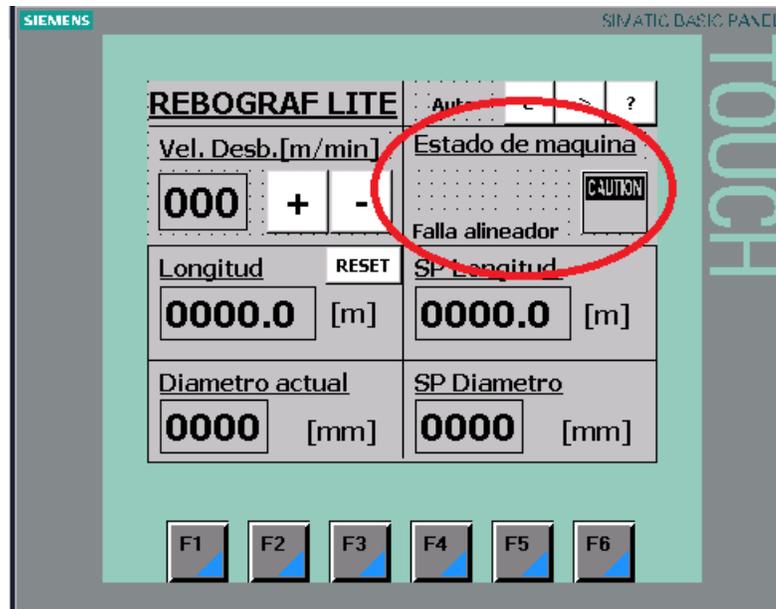
Para que el sistema muestre el estado de falla de variadores de velocidad se utilizara la ranura de test que incluye el guarda motor sirius con el fin de simular un estado de sobrecarga en el motor. En la figura 4.4 se observa que el panel táctil responde perfectamente indicando el estado de falla mencionado.



**Figura4. 4** Resultado prueba de falla de variadores de velocidad

En cuanto al sistema de alineación el sistema deberá mostrar un estado de falla cuando se accione uno de los finales de carrera que limitan el movimiento del cuerpo móvil.

Para simular este estado se presiona manualmente el final de carrera. En la figura 4.5 observamos que el panel responde inmediatamente mostrando el estado de falla del sistema de alineación.

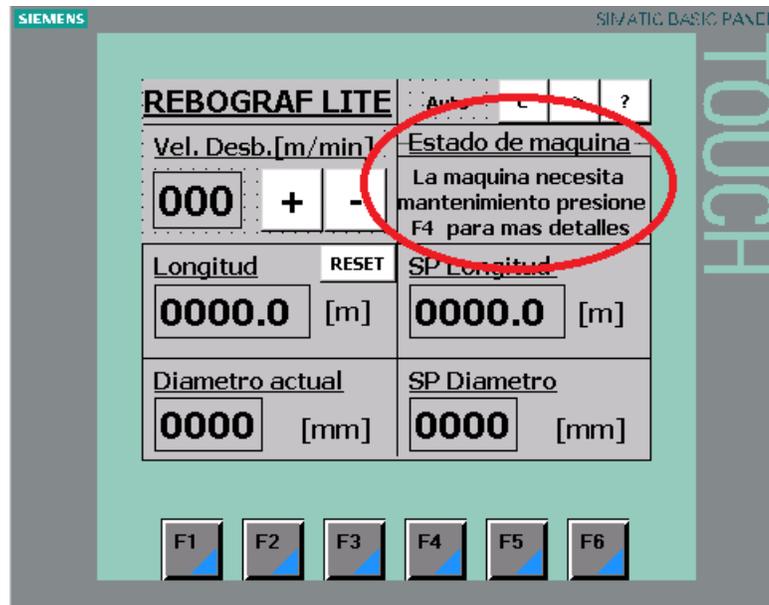


**Figura4. 5** Resultado prueba de falla del sistema de alineación

Para realizar pruebas del tercer ítem será necesario modificar la fecha del sistema con el fin de simular eventos de mantenimiento no realizados. De igual manera observamos en la figura 4.6 que el sistema muestra la advertencia correspondiente en el HMI del operador.

Una vez realizadas estas pruebas se garantiza la confiabilidad de la conectividad y del sistema de alarmas configurado en el panel Siemens KTP 600 mono. Además se realizan pruebas de calibración de la pantalla táctil y no se presenta ningún problema, la pantalla responde de manera normal cuando se requiere modificar algún parámetro.

En el Anexo 2, se puede verificar la configuración y manejo del panel táctil instalado en la máquina.



**Figura4. 6** Resultado prueba de mantenimiento preventivo no realizado

#### 4.5 PRUEBAS Y RESULTADOS DE LOS SISTEMAS DE SEGURIDAD

Los sistemas de seguridad son la parte más importante de un sistema automatizado de ellas depende la seguridad del personal que operará la máquina, en este proyecto se han montado seguridades como Pulsantes de emergencia tipo hongo, guarda motores, limites de seguridad, y pulsantes de paro.

En la máquina han colocado dos pulsantes tipo hongo, uno en el panel frontal del operador y otro en el panel posterior de la máquina, al realizar pruebas del funcionamiento del sistema observamos que el enclavamiento de este pulsante de seguridad debe ser perfecto, sin embargo observamos que el que se encuentra ubicado en el panel frontal no mantiene su posición de enclave por lo cual tuvo que ser reemplazado

inmediatamente. Se realizan pruebas del funcionamiento de los demás pulsantes y no se presenta ninguna novedad.

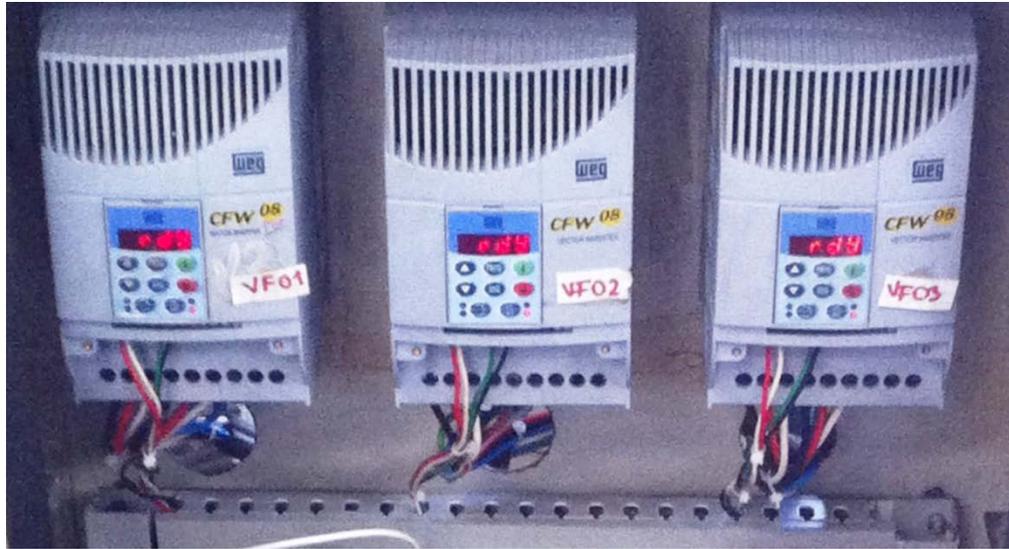
Para realizar pruebas de los sistemas de seguridad configurados y montados para protección de los variadores se procederá de la siguiente manera:

- Para probar los guarda motores se desconectara una de las fases a la entrada de este dispositivo.

- Para probar el estado de falla en los variadores se desconectara una de las fases en las borneras de salida hacia el motor de cada variador, al ocurrir esto el variador deberá mostrar la falla correspondiente en el display y deberá notificar al controlador mediante el relé de salida programado RL1.

Realizamos el primer procedimiento y observamos que todos los guarda motores funcionan con normalidad en caso de pérdida de una de las fases. Al ocurrir esto el variador se desenergiza y muestra el estado de falla "Sub".

En la figura 4.7 se observa el estado "ready" en los variadores, este estado mantiene activado el relé RL1 cuya señal común es enviada como realimentación al PLC de control. En todos los casos se enciende la luz de emergencia y se enciende la señal audible que indica falla en el sistema.



**Figura4. 7** Variadores de velocidad en estado normal de funcionamiento

#### **4.6 PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE ALINEACIÓN**

Para realizar las pruebas del sistema de alineamiento se colocan varias bobinas con diferentes características de espesor y color, se calibran los sensores con el fin de detectar el material y el fondo que en este caso es el rodillo auxiliar, se simulan cada uno de los casos mostrados en la tabla 3.7 del capítulo. El sistema responde de manera correcta en cada uno de los casos.

En la figura 4.8 se muestra el conjunto de sensores del sistema de alineamiento, el material que se visualiza corresponde a un perlado de espesor 40 micras. Se observa que el material está corrido hacia la derecha, el sistema detecta el estado actual y corrige la alineación del material moviendo el sistema hacia la derecha. En la figura 4.9 se observa que el material se ha alineado correctamente.



**Figura4. 8** Sensores fotoeléctricos A y B del sistema de alineamiento



**Figura4. 9** Acercamiento material alineado correctamente

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1. CONCLUSIONES**

- Se implemento exitosamente el sistema de control para la rebobinadora Rebograf lite 1200 cumpliendo con los requerimientos de planta siguiendo un esquema de trabajo planteado en dos etapas: control y fuerza.
- Se seleccionaron correctamente los equipos tomando en cuenta la aplicación a la que iban a ser sometidos luego de estudiar el comportamiento físico de la máquina.

- 
- Se diseño un sistema de medición mediante un contador de pulsos rápido HSC el cual permite determinar el diámetro del material a procesarse en la máquina.
  - Se implemento con éxito un sistema electromecánico que permite realizar de manera automática el alineamiento del material.
  - El programa desarrollado para el controlador fue construido analizando el proceso de rebobinado, además se tomo en cuenta las necesidades extras del personal con el fin de presentar una alternativa mejor que la que posee la planta actualmente.
  - La interfaz de usuario táctil facilita el proceso de supervisión e ingreso de parámetros por parte del usuario lo que se ve reflejado en la eficiencia de la máquina y menor uso de personal para operar la misma.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

- Para seleccionar los variadores de frecuencia es preciso verificar sus especificaciones técnicas, especialmente la temperatura y altitud de trabajo ya que es posible que el equipo no funcione correctamente y se produzca derrateo si no se cumplen las condiciones de instalación adecuadas.
- Cuando se utilicen y configuren sensores inductivos para funcionar en conjunto con la opción conteo rápido HSC es necesario realizar un filtrado de la entrada mediante

el software del controlador , si este lo permite, caso contrario se deberán usar métodos electrónicos para filtrar la entrada.

- La acometida hacia el tablero de fuerza siempre deberá poseer conexión a tierra para protección del usuario y de los equipos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Aren, R. P. (2001). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Barcelona, España: Alfaomega.

Automation, R., & Bradley, A. (2000). Fundamentos del sensado y detección de presencia. *Manual de Capacitacion* , 182.

Baumeister, T., & Avallone, E. (1978). *Manulal del ingeniero mecánico*. Marks: Mc.GrawHill.

Indriago, M. (2009). *Instituto Tecnológico Superior de Calkiní en el Estado de Campeche*.

Recuperado el 2013, de

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r34716.PDF>

Mazzeo, L., & Bertolotti, F. (2009). *Instituto Tecnológico Superior de Calkiní en el Estado de Campeche*. Obtenido de ITESCAM:

<http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r88242.PDF>

Pino, A. (2009). Guía práctica de selección y puesta en marcha de variadores de velocidad. *Sitec Guia practica No2* , 10.

Rodríguez, J. (2007). *Sitio web oficial de la especialidad de Electrotecnia de las Escuelas Técnicas Raggio*. Recuperado el 2013, de

[http://electroraggio.com/fs\\_files/user\\_img/VARIOS/Electronica\\_Industrial.pdf](http://electroraggio.com/fs_files/user_img/VARIOS/Electronica_Industrial.pdf)

*UNICROM todo sobre electrónica*. (s.f.). Obtenido de

[http://www.unicrom.com/Tut\\_estruct\\_luz.asp](http://www.unicrom.com/Tut_estruct_luz.asp)

*Wikipedia la Enciclopedia Libre*. (s.f.). Obtenido de

[http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_inductivo](http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_inductivo)

*Wikipedia la Enciclopedia Libre*. (s.f.). Obtenido de

[http://es.wikipedia.org/wiki/Reductores\\_de\\_velocidad](http://es.wikipedia.org/wiki/Reductores_de_velocidad)

## **ANEXO 1**

### **PLANO ELECTRICOS REBOGRAF LITE 1200**

## **ANEXO 2**

### **MANUAL DE USUARIO**

## **FICHA DE ENTREGA**

El presente proyecto fue entregado en el Departamento de Eléctrica y Electrónica, y reposa en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE desde:

Sangolquí, \_\_\_\_\_ del 2013

Elaborado por:

---

Sr. Christian González

171638966-1

Autoridad:

---

Ing. Luis Orozco

Director de la Carrera de Ingeniería en Electrónica

Automatización y Control