

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Propuesta de control para máquina cortadora y selladora**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**César Jiménez Mena**

**Cartago, Noviembre de 2017**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**ACTA DE APROBACIÓN**

**Defensa de Proyecto de Graduación  
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
Grado Académico de Licenciatura  
Instituto Tecnológico de Costa Rica**

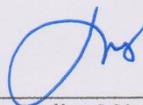
El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado Propuesta de control para máquina cortadora y selladora, realizado por el señor César Alberto Jiménez Mena y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador



Ing. Miguel Hernández Rivera

Profesor asesor



Ing. Luis Paulino Méndez Badilla

Profesor lector

Cartago, 30 de noviembre de 2017

## **Declaración de autenticidad**

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



César Jiménez Mena.

Cartago, 15 de noviembre de 2017.

Cédula: 1-1562-0563.

## **Resumen**

En este documento se presenta el diseño y simulación de un control para una máquina cortadora y selladora de bolsas.

Este control es necesario debido a que se tiene un riesgo de afectación en caso de que la máquina falle, pues es el equipo es de origen brasileño, y no tiene soporte técnico ni se consiguen reemplazos en el país. En este proyecto se presenta una solución preventiva a esta problemática.

Para el diseño se elaboran diagramas de conexión que muestran la relación entre los elementos de la máquina, así como de descripción del proceso. Además, se desarrolla el procedimiento que permite completar el proceso de fabricación, a través del uso de motores, sensores y actuadores.

Se elabora el código de programación para el PLC y un panel gráfico. Este programa se simula con el software del fabricante y verifican los resultados esperados.

Palabras clave: Automatización, Controladores Omron, Mantenimiento Preventivo, Producción de Bolsas Plásticas.

## **Abstract**

This document presents the design and simulation of control system for plastic bag cutting and sealing machine.

This control is necessary because exists a risk of affectation in case of fail in the machine, since the equipment is from brazil, and doesn't have technical support and spares in the country. This project presents a preventive solution for the problem.

Connection diagrams are made to show the relationship between components of the machine and process description. Besides, a procedure to complete the fabrication process is developed, using motors, sensors and actuators.

A programming code for the PLC and graphic interface is developed. This program is simulated with maker's software and expected results are confirmed.

**Keywords:** Automatization, Omron Controllers, Preventive Maintenance, Plastic Bags Production.

*A mis padres.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres, quienes han estado siempre a mi lado. Gracias a su apoyo, motivación, consejos y ejemplo he podido salir adelante. A mi hermana, quien siempre trata de mostrarme el lado positivo de cualquier situación, y a familiares quienes de manera incondicional me ayudaron cuando lo necesité.

Al Ing. Jairo Quesada y el técnico Hans Méndez, por atender de manera atenta todas mis consultas y apoyar activamente en el desarrollo de este proyecto. Gracias por haberme recibido de la mejor manera.

Finalmente, agradezco a los buenos funcionarios del Instituto Tecnológico de Costa Rica, quienes aportaron para mi desarrollo personal y me colaboraron en algún momento.

César Jiménez Mena.

15 de noviembre de 2017.

# Contenido

Índice de figuras .....	x
Índice de tablas .....	xii
Capítulo 1    Introducción .....	1
1.1        Máquinas para producción de plásticos en Irex de Costa Rica.....	1
1.2        Sustitución del equipo de control.....	2
1.3        Estructura del documento .....	3
Capítulo 2    Marco teórico .....	5
2.1        Servomotor.....	5
2.2        Variador de frecuencia .....	6
2.3        Decodificador óptico.....	8
2.4        Termopar.....	8
2.5        Cilindro neumático .....	9
2.6        Fotocélula.....	10
2.7        Controlador .....	11
2.8        Grafcet .....	12
2.9        Relación de engranajes y movimiento rotacional con lineal .....	12
2.10       Descripción Del Proceso.....	13
Capítulo 3    Diagrama de la máquina .....	16
3.1        Diagrama general .....	16
3.2        Diagrama del motor desbobinador.....	18
3.3        Diagrama del servomotor.....	18
3.4        Diagrama del motor del cabezal .....	19

3.5	Diagrama del motor de las fajas .....	20
3.6	Diagrama de la unidad de temperatura .....	21
3.7	Diagrama de accesorios .....	22
3.8	Señales de control .....	23
Capítulo 4	Control de los elementos de la máquina .....	25
4.1	Sincronización de los elementos .....	25
4.2	Control de motor con variador de frecuencia .....	31
4.3	Control motor del cabezal.....	31
4.4	Control motor de fajas .....	33
4.5	Control del servomotor .....	33
4.6	Control de temperatura .....	35
Capítulo 5	Programación del control y simulación .....	37
5.1	Cálculo de posición del cabezal y transporte de servomotor .....	37
5.2	Programación del control.....	39
5.3	Panel gráfico .....	41
5.4	Simulación .....	44
5.4.1	Prueba 1 .....	46
5.4.2	Prueba 2 .....	47
5.4.3	Prueba 3 .....	49
5.4.4	Prueba 4 .....	51
Capítulo 6	Conclusiones y recomendaciones .....	53
6.1	Conclusiones.....	53
6.2	Recomendaciones .....	54
Referencias	.....	55

Apéndice A	Manual de operación y programación.....	57
Apéndice B	Dirección de entradas y salidas del PLC.....	67
Apéndice C	Glosario y abreviaturas .....	68

## Índice de figuras

Figura 2.1. Servomotores de la línea SWA [3] .....	5
Figura 2.2. Servoamplificador SCA 05 con conexiones de alimentación [3] .....	6
Figura 2.3. Diagrama de entradas y salidas del variador de frecuencia VLT Micro [5] .....	7
Figura 2.4. Rangos de temperatura para los tipos de termopar más comunes [6] .....	9
Figura 2.5. Cilindro neumático de simple efecto [7] .....	10
Figura 2.6. Conexiones de fotocélula Wenglor WM03PCT2 [8] .....	11
Figura 2.7. Entradas (CIO 0 - CIO 1) y salidas (CIO 100 - CIO 101) de PLC seleccionado [9] .....	11
Figura 2.8. Ubicación física de los elementos en sección compensadora .....	14
Figura 2.9. Ubicación física de elementos principales de la máquina .....	15
Figura 3.1. Diagrama general de la máquina .....	17
Figura 3.2. Señales de control para motor desbobinador .....	18
Figura 3.3. Señales de control para servomotor .....	19
Figura 3.4. Señales de control para motor de cabezal .....	20
Figura 3.5. Señales de control para motor de fajas .....	20
Figura 3.6. Señales de control para unidad de temperatura .....	21
Figura 3.7. Señales de control para accesorios y fotocélula .....	22
Figura 4.1. Graficet de control maestro .....	26
Figura 4.2. Ilustración de ángulos en eje del cabezal .....	28
Figura 4.3. Graficet nivel 2 del modelado del proceso .....	30
Figura 4.4. Curva de velocidad en función de la entrada (configuración más común) [5] .....	32
Figura 4.5. Diagrama de flujo proceso de autotuning .....	36
Figura 5.1. Pantalla de configuración para los contadores rápidos .....	37
Figura 5.2. Secciones del programa para el controlador .....	40
Figura 5.3. Pantalla principal del panel gráfico .....	42
Figura 5.4. Pantallas secundarias (a) Compensación (b) Intermedia (c) Engranaje (d) Fajas .....	43
Figura 5.5. Pantalla para configuración de temperatura .....	44
Figura 5.6. Datos de simulación prueba 1 .....	47

Figura 5.7. Datos de simulación prueba 2 .....	48
Figura 5.8. Prueba de proceso de falla .....	49
Figura 5.9. Activación de cilindro ponchador en prueba 3 .....	50
Figura 5.10. Uso de fotocélula en prueba 3 .....	50
Figura 5.11. Simulación de fin de transporte en prueba 4 .....	51
Figura 5.12. Simulación de paro total de la marcha en prueba 4 .....	52
Figura A. 1. Desbobinado y compensación .....	58
Figura A. 2. Ubicación de los elementos en la máquina .....	58
Figura A. 3. Engranajes .....	59
Figura A. 4. Detalle referencia de posición del motor principal .....	60
Figura A. 5. Pantalla principal del panel gráfico .....	62
Figura A. 6. Pantalla de configuración de temperatura .....	64

## Índice de tablas

Tabla 3.1. Resumen de señales de entrada y salida requeridas para el control .....	23
Tabla 5.1. Equivalencia entre valor del contador y ángulo del cabezal .....	39
Tabla 5.2. Equivalencia entre valor del contador y ángulos para simulación .....	45
Tabla A. 1. Posición de referencia para cada etapa.....	61
Tabla A. 2. Instrucciones para ajuste del ángulo de activación.....	66
Tabla B. 1. Dirección de entradas y salidas del PLC .....	67

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1 Máquinas para producción de plásticos en Irex de Costa Rica

La empresa Irex de Costa Rica S.A se dedica a la comercialización de detergentes, artículos de limpieza y alimentos procesados. Cuenta con varias plantas para satisfacer la demanda en los mercados que se encuentra.

En la planta ubicada en el cantón de La Unión en Cartago existe una zona de producción, denominada en la empresa como área de plásticos, donde se producen, entre otras cosas, bolsas plásticas para ser trasladadas a otros sectores donde se llenan con el producto. Asimismo, se puede tener en inventario una cantidad considerando alguna situación especial.

La producción de estas bolsas se hace a partir del corte y sellado de bobinas de polietileno, utilizando máquinas diseñadas para realizar este proceso de manera automática con la programación de un operario. Algunas de estas máquinas fueron adquiridas en Brasil, y cuentan con varios años en la empresa.

Estas máquinas están operando actualmente de manera continua. No obstante, a una de estas se le realizó un trabajo recientemente para sustituir el elemento de control, debido a que fue necesario por una falla.

La máquina con la que se trabaja en este proyecto cuenta con distintos elementos mecánicos y eléctricos que permiten completar la operación, tales como: cilindros neumáticos, motores trifásicos, servomotor, entre otros. Estos dispositivos son controlados por un CNC SX570, el cual es el controlador de fábrica para la máquina citada.

Este CNC con el que cuenta presenta algunas desventajas con respecto a otros instrumentos de control, como los PLC. El principal inconveniente es que no es un dispositivo que se pueda adquirir en el país, y por lo tanto si se daña se debería importar, lo que implica un costo en tiempo y económico.

Otro obstáculo que presenta este controlador es más complejo detectar una falla específica que en un PLC, donde las salidas y entradas son fácilmente identificables., y se cuentan con módulos

específicos Esto es debido a que es como una placa donde las señales no son fácilmente accesibles, lo que implica un costo adicional para detectar una falla.

El área de mantenimiento tiene a cargo las labores de reparación y prevención de equipos en la fábrica, para evitar en todo lo posible los paros de la producción. Acorde con esto, identifican posibles situaciones que pueden significar un contratiempo importante, tal como el caso expuesto anteriormente.

Por tanto, de manera preventiva desean contar con una propuesta para eliminar el riesgo de un paro en la máquina mencionada, y poder analizar la factibilidad de implementarlo en el futuro, o tenerlo a disposición para disminuir el tiempo de implementación.

## **1.2 Sustitución del equipo de control**

Debido a que la máquina está en funcionamiento actualmente lo que se requiere es un diseño en el que sustituya el equipo que es difícil de conseguir, en este caso el CNC.

Se pretende contar con la mayoría de componentes que posee actualmente la máquina, y que pueden ser controlados adecuadamente por otro dispositivo.

Considerando que la máquina está actualmente en funcionamiento se busca entonces presentar una propuesta de control, y que sean los colaboradores del departamento correspondiente en la empresa los que valoren la posibilidad de implementarlo de manera preventiva.

Sin embargo, de igual forma se disminuye un posible impacto por paro de la máquina si previamente ya se cuenta con el diseño del sistema de control para sustituir el equipo, y que se pueda implementar en caso de fallo.

Para reducir el riesgo de paro se presenta una descripción detallada del funcionamiento de la máquina, con la identificación de entradas y salidas indispensables para la operación de los elementos con los que se cuenta.

Mediante diagramas se pretende detallar de la forma más clara posible todos elementos del sistema y su interconexión. De esta forma se garantiza que otro colaborador pueda apoyarse en

estos diagramas para detectar las señales esenciales, y eventualmente conectar de manera adecuada el nuevo controlador.

Se busca determinar cómo es que opera la máquina; es decir, cuál es la acción que tiene cada componente en determinado momento para poder elaborar de manera correcta la bolsa, a partir del corte de la bobina de polietileno. Con esto se presenta un modelo del proceso, con las acciones y condiciones que permiten llevar a cabo el ciclo de corte y sellado.

También se presenta el diseño para el control de cada elemento, mostrando las ecuaciones que permiten hacer el manejo de las variables de proceso para el correcto funcionamiento de cada uno de los dispositivos, obteniendo de esta forma un comportamiento o acción deseada.

Debido a que los motores cuentan con controladores específicos para cada uno, la interacción entre el control principal y el motor dependen del funcionamiento de los variadores de frecuencia y el servoamplificador. El identificar cómo interactúan los componentes es una de las principales tareas, en las que se basa el trabajo, pues se especifican las señales necesarias de acuerdo a los parámetros de operación.

El ahorro de tiempo al modelar la interacción de los componentes en el proceso, es uno de las principales ventajas de contar con el diseño del control.

De igual forma es importante contar con la programación del controlador seleccionado, ya que con esto se identifican características esenciales que debe poseer el autómeta.

Además, para poder verificar que el proceso está modelado de manera correcta y que las señales de entrada y salida son las esperadas de acuerdo a los parámetros de fabricación, se verifica mediante simulación el programa elaborado para el controlador, donde se aprecia la sincronía del proceso y la coherencia de resultados según los parámetros que introduce el operador.

### **1.3 Estructura del documento**

En el capítulo 2 se presentan fundamentos teóricos de los principales componentes que se deben controlar en la máquina, así como otros conceptos requeridos para el diseño del control.

En el capítulo 3 se muestra el diagrama de conexión, donde se identifican las señales de control, y como se relacionará el controlador con cada uno de los elementos involucrados en el proceso.

En el capítulo 4 se presenta el diseño del control tanto para cada componente como para la sincronización de eventos que permiten completar el proceso.

En el capítulo 5 se detalla la programación del PLC seleccionado y el panel gráfico, con los que se puede simular el funcionamiento y verificar los resultados esperados.

Las conclusiones y recomendaciones obtenidas se presentan en el capítulo 6.

## Capítulo 2 Marco teórico

### 2.1 Servomotor

Un servomotor en CA requiere del servoamplificador y el servomotor. Con el servoamplificador se reciben las señales de control, ya sea para torque, velocidad o posición, y las amplifica al nivel que el servomotor necesita [1].

La posición del servomotor puede ser conocida ya sea con un decodificador óptico o un *resolver*, que se describe como como un pequeño transformador con un devanado primario en el eje y dos secundarios estacionarios con una orientación de  $90^\circ$  [2]. El servomotor con el que se trabaja en este proyecto cuenta con un *resolver* para conocer la posición, sin embargo, el servoamplificador lee estos datos y simula una señal de un decodificador óptico. Por lo tanto, el control se trabaja con un decodificador y no con un *resolver*.

Los servomotores que se aprecian en la figura 2.1 son de la línea SWA, los cuales son trifásicos sin escobillas y de imán permanente [3]. Específicamente se dispone de un servomotor WEG SWA 71 – 9.3 – 30.



Figura 2.1. Servomotores de la línea SWA [3]

Este servomotor funciona con un servoamplificador WEG SCA-05 24/48, que se muestra en la figura 2.2, con el cual se pueden configurar distintos parámetros dependiendo de la aplicación y el tipo de control que se quiera implementar. Cuenta con entradas y salidas configurables analógicas y digitales. El modo de control puede ser por posición, torque o velocidad. Por el primer modo el servomotor mantiene la posición constante de acuerdo a la referencia. En el control por velocidad el servomotor mantiene una velocidad constante según la referencia, que puede ser una entrada analógica o un parámetro establecido, y el torque varía en función de la carga. Por último, en el control por torque se mantiene la corriente constante (torque es proporcional a la corriente) según la referencia, sin considerar la posición o velocidad [3].

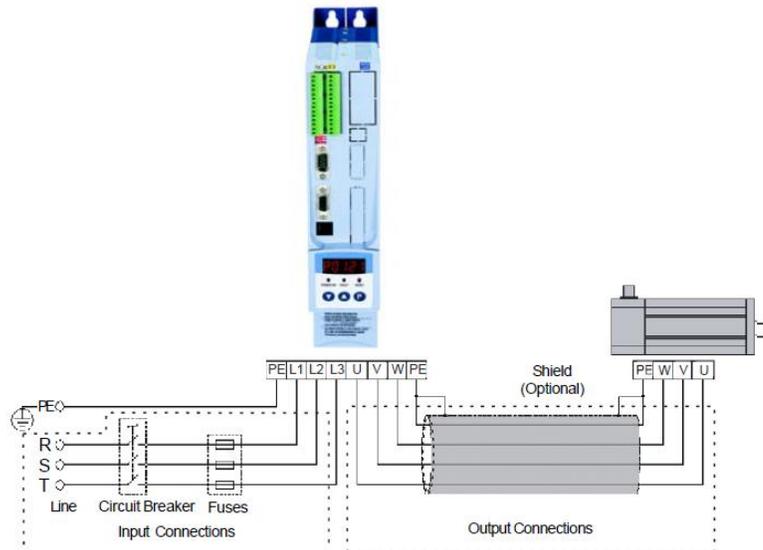


Figura 2.2. Servoamplificador SCA 05 con conexiones de alimentación [3]

## 2.2 Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia (VFD, por sus siglas en inglés) es un regulador industrial ubicado entre la alimentación energética y el motor. De esta forma controla la cantidad de energía de la red que llega al motor, según los requisitos del procedimiento.

Estos dispositivos convierten la frecuencia fija de la alimentación de CA a una señal CD, posteriormente calculan la potencia requerida por el motor, convirtiendo la señal CD en la que requiere el proceso a través de un inversor, con la tensión y la corriente precisa [4].

Para este proyecto el variador de frecuencia a utilizar es el Danfoss VLT Micro, con el que se controlan tres motores de la máquina. En este dispositivo se pueden configurar distintos parámetros para ajustar el funcionamiento de la mejor forma de acuerdo a la aplicación del motor. Por ejemplo, se puede establecer si la referencia de la frecuencia es por tensión (entrada AVI), corriente (entrada ACI) o un parámetro establecido [5].

La figura 2.3 muestra las entradas y salidas que se pueden con las que cuenta este variador de frecuencia. Dependiendo de la configuración establecida se determinan los pines a utilizar. Se aprecia que para la señal de referencia se puede utilizar AVI (tensión) o ACI (corriente).

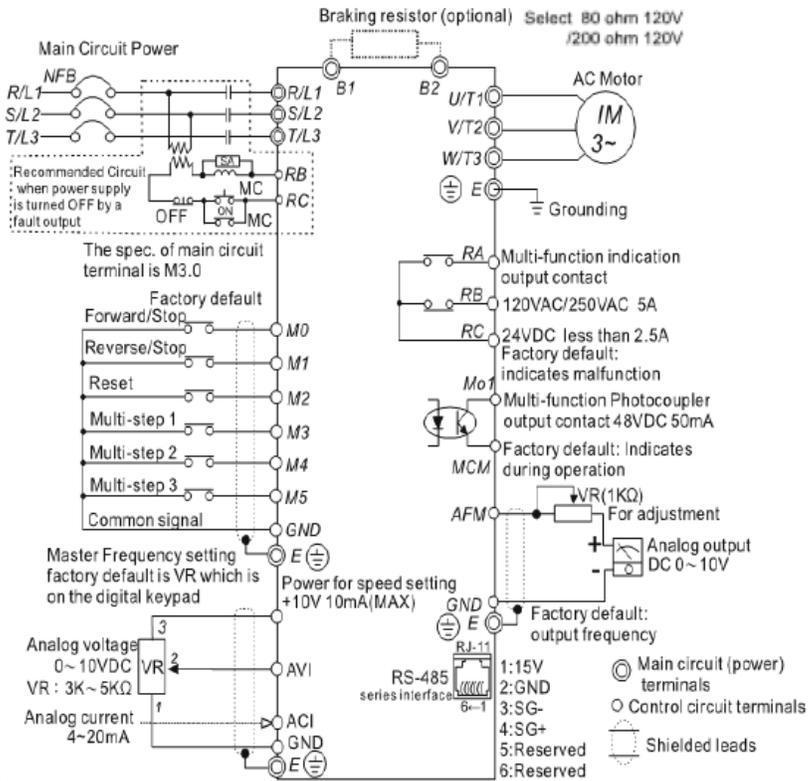


Figura 2.3. Diagrama de entradas y salidas del variador de frecuencia VLT Micro [5]

### **2.3 Decodificador óptico**

Un decodificador óptico (*encoder*) utiliza un disco con marcas uniformemente espaciadas montado sobre el eje. La resolución del decodificador óptico depende de la cantidad de divisiones que tenga el disco.

Normalmente se describen las señales de salida como A y B. Con la posición relativa de los fotosensores se puede determinar la dirección de rotación, dependiendo de si el canal A sigue al B o viceversa.

Un tercer canal, normalmente llamado Z, sirve para identificar una revolución del eje y se incluye si es necesaria [2].

En este proyecto se cuenta con un decodificador óptico Suprasonic de 2500 pulsos conectado al motor del cabezal y un decodificador simulado por el servoamplificador.

### **2.4 Termopar**

Un termopar es un sensor que permite medir la temperatura aprovechando el efecto Seebeck. Se fabrican con la unión de dos metales distintos, y al calentarse o enfriarse esta terminación se puede medir en circuito abierto una tensión relacionada a la temperatura y los metales de fabricación. Incluso se pueden encontrar tablas donde según el tipo de termopar, se muestra la tensión correspondiente a la temperatura que mide [6]. Existen varios tipos de termopares, cuyos rangos de temperatura se resumen en la figura 2.4.

Common Thermocouple Temperature Ranges			
Calibration	Temperature Range	Standard Limits of Error	Special Limits of Error
J	0° to 750°C (32° to 1382°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
K	-200° to 1250°C (-328° to 2282°F)	Greater of 2.2°C or 0.75%	Greater of 1.1°C or 0.4%
E	-200° to 900°C (-328° to 1652°F)	Greater of 1.7°C or 0.5%	Greater of 1.0°C or 0.4%
T	-250° to 350°C (-328° to 662°F)	Greater of 1.0°C or 0.75%	Greater of 0.5°C or 0.4%

Figura 2.4. Rangos de temperatura para los tipos de termopar más comunes [6]

La máquina con la que se trabaja cuenta con tres termopares aislados tipo J del fabricante Camtec. Con este termopar se mide la temperatura que tiene la resistencia calefactora en el cabezal y se realimenta esta señal al control.

## 2.5 Cilindro neumático

Un cilindro neumático contiene un pistón en su interior que se desliza y transmite su movimiento al exterior mediante un vástago. Existen cilindros neumáticos de doble efecto, de simple efecto, como el de la figura 2.5, entre otros [7].

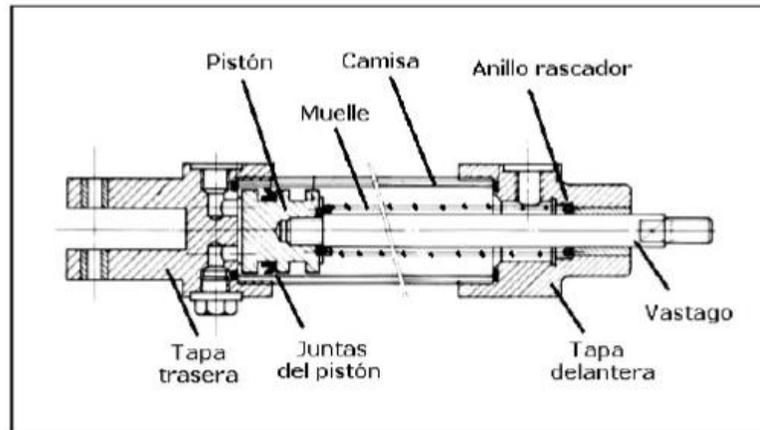


Figura 2.5. Cilindro neumático de simple efecto [7]

La máquina cuenta con cuatro cilindros neumáticos en la sección compensadora. Con esto se asegura que la bobina de polietileno tenga la tensión adecuada cuando son transportadas por el servomotor.

Dos cilindros de doble efecto están ubicados antes de la fotocélula por encima de la máquina, que sirven para hacer una perforación en la bolsa. Finalmente, se cuenta con un cilindro que se activa cuando finaliza el proceso para elevar el cabezal a la “posición cero” de la máquina.

## 2.6 Fotocélula

La fotocélula con la que se cuenta es un sensor Wenglor WM03PCT2, el cual permite reconocer la diferencia de brillo entre la impresión en la bobina de polietileno y el fondo, utilizando un LED de luz blanca. Se puede alimentar con una tensión desde 10 V hasta 30 V y se puede conectar tanto con lógica positiva como negativa, como se muestra en la figura 2.6, donde  $A/\bar{A}$  representa la salida [8].

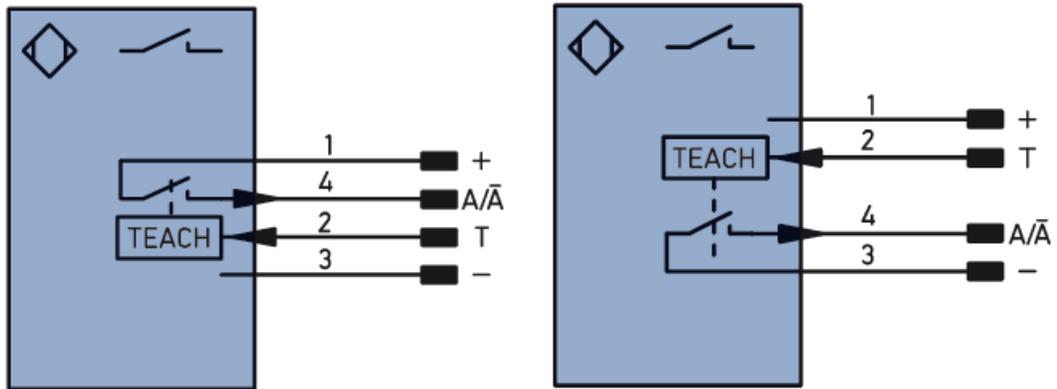


Figura 2.6. Conexiones de fotocélula Wenglor WM03PCT2 [8]

## 2.7 Controlador

Como controlador para desarrollar el proyecto se eligió un CP1H-XA40DT1-D, programable con el software CX Programmer, que es uno de los que se tienen en la empresa. Este programa se puede simular junto con el CX Designer, que se utiliza para programar los paneles gráficos, y también está disponible.

Este PLC cuenta con 24 entradas y 16 salidas digitales. La alimentación es por corriente directa de 24 V y las salidas son de transistor. Se pueden implementar cuatro contadores rápidos de fase diferencial o única, desde CIO 0.01 hasta CIO 1.00. También cuenta con dos salidas analógicas con resolución de 1/6000 o 1/12000 en los canales CIO 210 y CIO 211. La figura 2.7 muestra la distribución de entradas y salidas de este dispositivo [9].

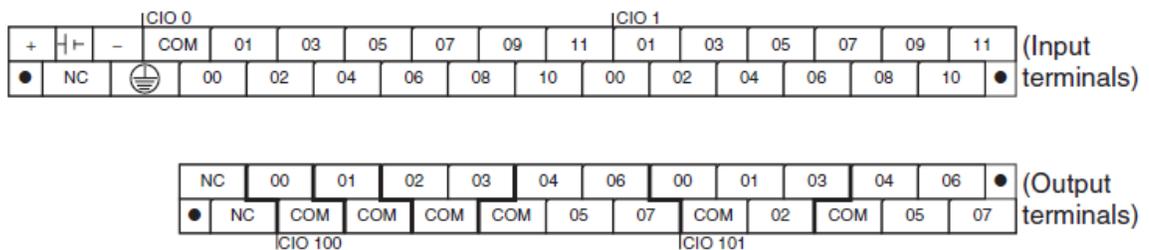


Figura 2.7. Entradas (C/O 0 - C/O 1) y salidas (C/O 100 - C/O 101) de PLC seleccionado [9]

Este PLC de OMRON cuenta con distintas áreas de memoria, donde algunas son de solo lectura, otras están reservadas, o se borran cuando se elimina la alimentación del PLC por lo que es importante identificarlas para la programación del PLC [10].

En conjunto con el PLC se utilizan dos módulos de expansión. El primero es el CP1W-DA021, el cual cuenta con dos salidas analógicas con una resolución de 1/6000, y configurable para tener señal de 4 a 20 mA. También se agrega el módulo CJ1W-TC002 que cuenta con 4 lazos de control de temperatura para entradas de termopares [9].

## 2.8 Grafcet

El Grafcet es un método gráfico para el modelado del control de sistemas industriales, que está basado en las Redes de Petri. Es norma internacional (IEC-848) desde el año 1988 y norma ISO (IEC 60848) desde el 2002, denominada “*Grafcet Specification Language for Sequential Function Chart*”. No debe confundirse con el lenguaje *Sequential Flow Chart* (SFC), aunque son similares.

Existen tres niveles de Grafcet: nivel 1 o funcional, nivel 2 o tecnológico y nivel 3 u operativo. En el primero se da una definición del comportamiento del sistema en términos no técnicos. En el segundo nivel se propone la solución a nivel técnico, donde se idea la parte operativa del automatismo. En el último nivel se determina el modo en que el control opera, por lo que se deben especificar las señales que se consideren [11].

## 2.9 Relación de engranajes y movimiento rotacional con lineal

Un motor puede transferir la potencia para obtener un desplazamiento lineal. En el caso de este proceso el conocer esta distancia es muy importante pues se requiere determinar exactamente donde se realiza el corte. La razón entre engranajes incide en la velocidad final obtenida desde el motor y a la vez en el desplazamiento, tal como lo muestran las ecuaciones 2.1 y 2.2, donde la primera indica la relación entre el tamaño de la rueda dentada y el desplazamiento lineal, y la segunda muestra como considerar la relación en el engranaje [12].

$$X = r\theta \quad (2.1)$$

$$n = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

## 2.10 Descripción Del Proceso

La máquina con la que se trabaja prepara las bolsas para ser enviadas a otra línea de producción, donde posteriormente se llenan con el producto correspondiente.

En el proceso se coloca en la parte inicial una bobina de polietileno, ya sea impresa o no. Un motor desenrolla este material y la sección compensadora, que consta de cuatro cilindros neumáticos, se encarga de mantener la tensión adecuada. El servomotor transporta el material a través de unos rodillos desde esta sección hasta la etapa de corte.

Cuando se requiere, se realiza una perforación por la acción de dos cilindros neumáticos. Seguido a esto se encuentra la fotocélula, que en caso de estar activada identifica la marca de la bolsa si esta es impresa; con lo que se controla el recorrido del servomotor.

Finalmente, el cabezal corta la bolsa y sella por un lado de esta, para luego ser transportada por las fajas y el motor apilador hasta el final del proceso, donde un operario manualmente recolecta una cantidad específica de bolsas y las empaca.

En las figuras 3.7 y 3.8 se detalla la ubicación física de los elementos principales de la máquina según la numeración siguiente:

1. *Desbobinador*
2. Cilindro neumático 1 (compensación)
3. Cilindro neumático 2 (compensación)
4. Bobina de polietileno
5. Cilindro neumático 3 (ponchador)
6. Fotocélula
7. Cabezal
8. Fajas

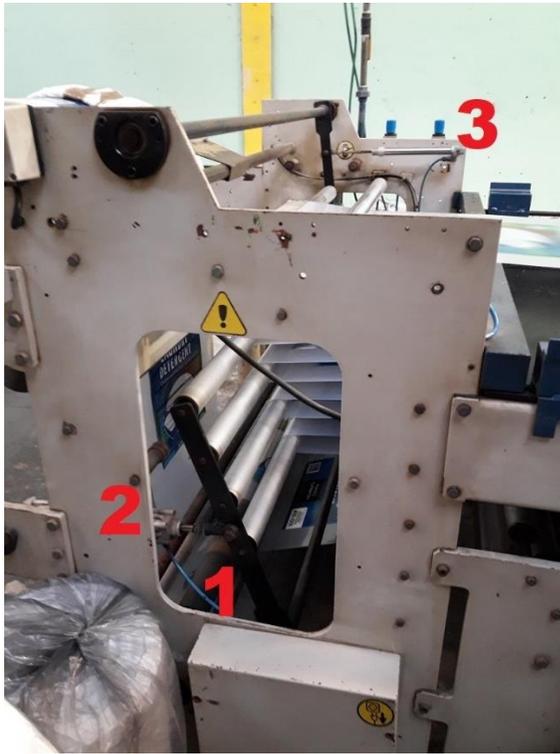


Figura 2.8. Ubicación física de los elementos en sección compensadora

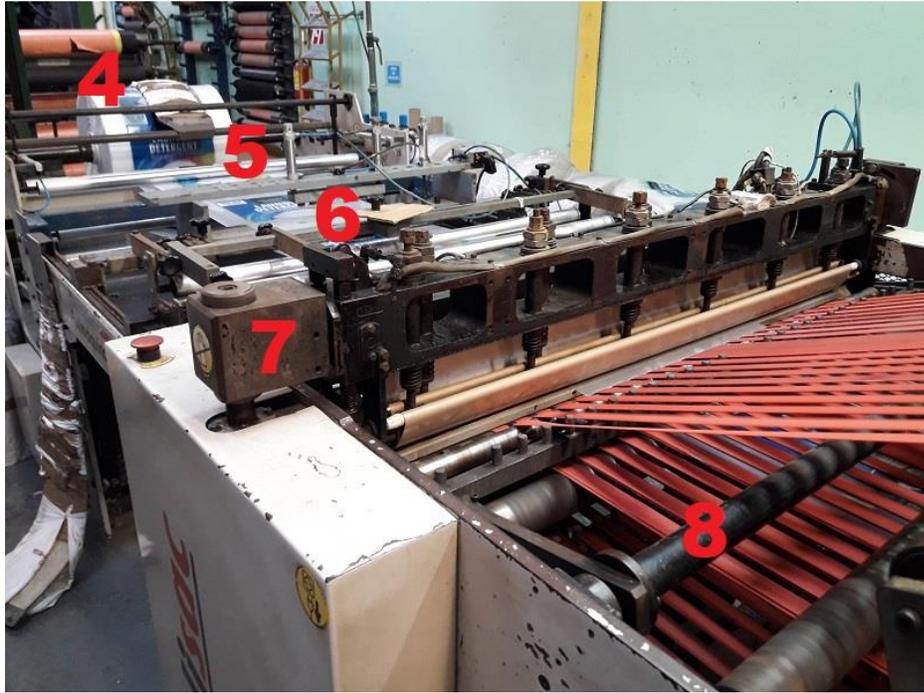


Figura 2.9. Ubicación física de elementos principales de la máquina

## **Capítulo 3 Diagrama de la máquina**

Con el fin de poder diseñar el control que se requiere, se procede a establecer cuales son todos los elementos que componen la máquina y la relación en el proceso, mostrando también de manera detallada las señales de control necesarias.

Estos diagramas se obtuvieron basándose en el manual de operación y el diagrama eléctrico de la máquina que fueron proporcionados por la empresa, además de observaciones presenciales en el lugar del proceso.

### **3.1 Diagrama general**

La figura 3.1 muestra todos los elementos que se deben considerar. Las flechas indican la dirección de las señales de control. Los accesorios corresponden a elementos que únicamente reciben una señal para activarlo, como cilindros neumáticos o el motor apilador. Todos los demás elementos realimentan al menos una señal para indicar el correcto funcionamiento. Las señales que salen desde el control en algunos casos son solo de activación, y en otros también la referencia, por ejemplo, la velocidad del motor.

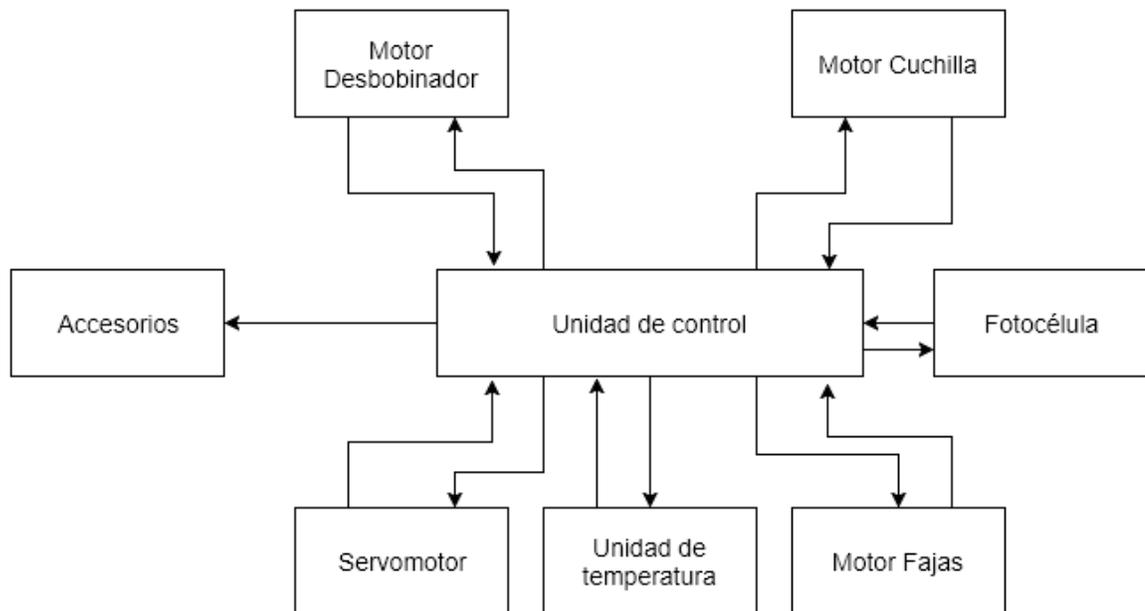


Figura 3.1. Diagrama general de la máquina.

El elemento de control para todos los dispositivos es el mismo, como se aprecia en la figura 3.1, de manera que en las figuras subsiguientes el bloque de control se refiere a un mismo controlador con sus módulos respectivos.

Entre los accesorios se tienen los cilindros neumáticos 1 y 2, corresponden en realidad a un par de cilindros (uno en cada lado) que se activan a la vez en la etapa compensadora, por lo tanto, para el control se maneja una única señal de salida. De manera similar el cilindro neumático 3 son dos cilindros de doble efecto con el mismo comportamiento y corresponden al cilindro ponchador, el cual hace una perforación en la bobina. Asimismo, el cilindro neumático 4 se activa para elevar el cabezal cuando se detiene el proceso.

Las tres resistencias calefactoras que se tienen están especificadas como una unidad, ya que el diseño del control para las tres es idéntico, pues comparten muchas características y la principal diferencia es únicamente la ubicación física en la máquina.

En los diagramas siguientes se detalla la conexión de cada elemento. En estos se resumen las señales de control y por simplificación se omiten las señales de potencia o alimentación, considerando que estas conexiones pueden ser consultadas en el diagrama eléctrico y no son indispensables para el diseño del control. La descripción de las señales se muestra en la tabla 3.1, luego de mostrar todos los componentes.

### 3.2 Diagrama del motor *desbobinador*

Este motor tal como se mencionó anteriormente desenrolla la bobina de polietileno. Este procedimiento lo hace automáticamente al contar con dos sensores conectados al variador de frecuencia, los cuales lo activan dependiendo de la posición de la etapa compensadora, que se mueve por la acción de los cilindros neumáticos 1 y 2. Por tanto únicamente se debe activar el variador de frecuencia y se recibe una señal que indica un funcionamiento correcto, lo que se aprecia en la figura 3.2.

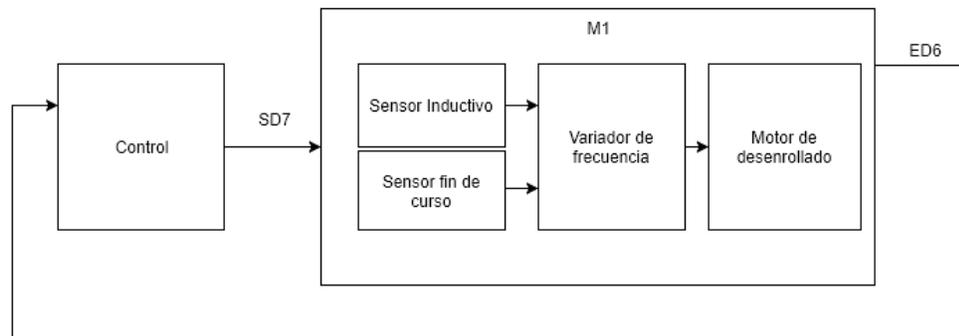


Figura 3.2. Señales de control para motor *desbobinador*

### 3.3 Diagrama del servomotor

En la etapa del servomotor, que se muestra en la figura 3.3, el controlador se comunica únicamente con el servoamplificador, enviando la señal de activación y la referencia de velocidad. Las señales

que se reciben son de verificación de funcionamiento correcto y las señales del decodificador óptico.

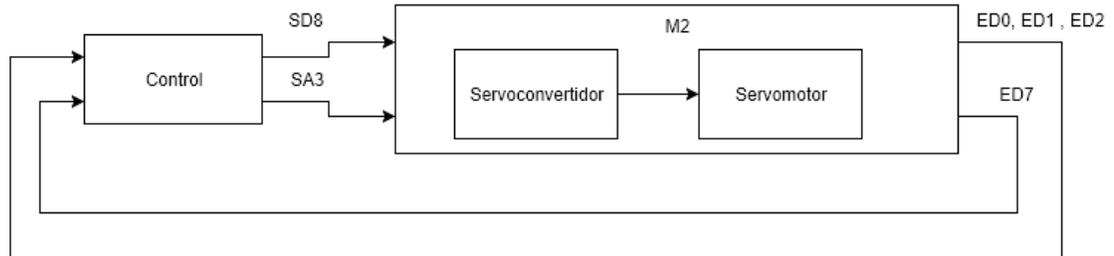


Figura 3.3. Señales de control para servomotor

### 3.4 Diagrama del motor del cabezal

El motor del cabezal cuenta con la señal de habilitación, señal analógica de referencia y una señal que habilita el freno del motor. De igual forma realimenta una señal digital indicando el correcto funcionamiento y las señales del decodificador óptico.

El cilindro neumático 4 se incluye como parte de los elementos que se deben controlar en esta etapa, pues eleva el cabezal cuando se detiene la máquina. La acción de este cilindro neumático es controlada por una salida digital.

Este motor también se denomina el motor principal, pues los elementos restantes que se deben sincronizar en el proceso actúan en función de la posición del cabezal, y es una de las etapas que más conexiones tiene con el controlador, tal como se muestra en la figura 3.4.

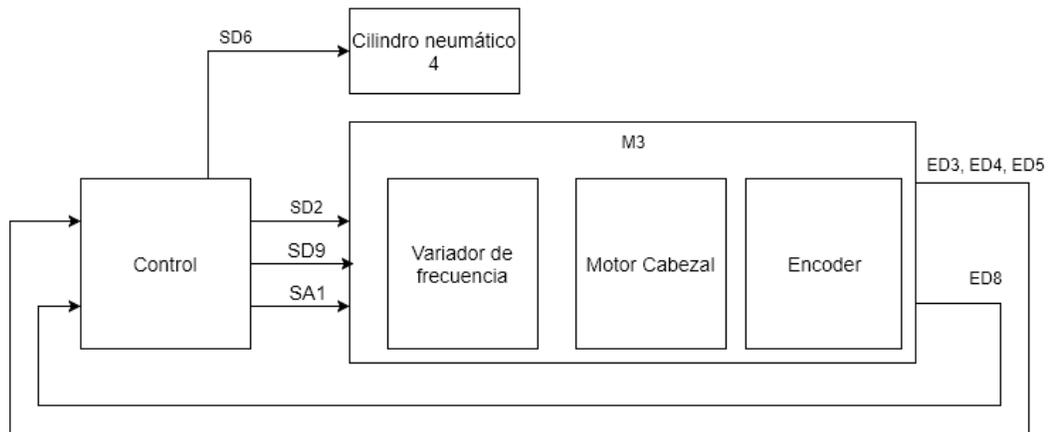


Figura 3.4. Señales de control para motor de cabezal

### 3.5 Diagrama del motor de las fajas

La figura 3.5 muestra el diagrama del motor de las fajas, que se encuentran en la etapa final del proceso y son completamente independientes, es decir, su velocidad puede ser controlada manualmente por el operador, pero no incide en los demás elementos. Esto es debido a que solo hace girar las fajas que sacan las bolsas terminadas al final de la producción, y se mantiene funcionando de manera continua.

Debido a lo anterior no tiene realimentación al controlador aparte de la señal que indica un funcionamiento correcto. Se envían las señales de control, igual que en los motores anteriores, pero la referencia es establecida de manera manual a través de la interfaz de la pantalla.

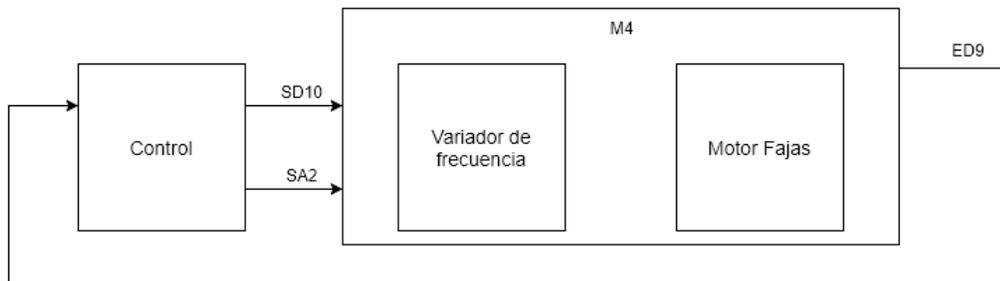


Figura 3.5. Señales de control para motor de fajas

### 3.6 Diagrama de la unidad de temperatura

El módulo de temperatura cuenta con tres etapas que se controlan de la misma forma. No obstante, estos pueden funcionar a diferentes temperaturas, por lo que se requiere tres señales de control. La salida de control se conecta a unos relés con los que se alimenta la potencia a las resistencias. Los termopares realimentan hacia el controlador una señal analógica correspondiente a la temperatura actual. Esto se aprecia en detalle en la figura 3.6.

Estas entradas y salidas se conectan directamente al módulo CJ1W-TC002, e interactúan con el PLC a través de un espacio de memoria. Este módulo cuenta con cuatro lazos de control, de los cuales se utilizan los primeros tres para el control de temperatura en sección inferior (lazo 1), superior delantera (lazo 2) y superior trasera (lazo 3).

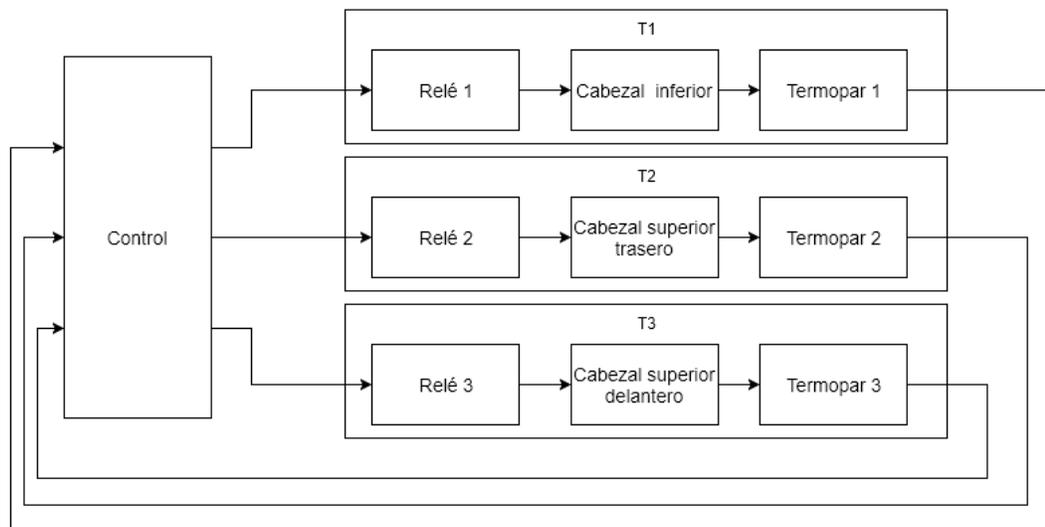


Figura 3.6. Señales de control para unidad de temperatura

### 3.7 Diagrama de accesorios

En el diagrama de la figura 3.7 se ubicaron los elementos que por sus características tienen un comportamiento de dos estados dependiendo de la salida del controlador. Estos son: la fotocélula, el motor apilador, el inhibidor de estática y los cilindros uno, dos y tres.

La fotocélula cuenta con dos señales, una de entrada que habilita este sensor y una salida que es la lectura de la fotocélula. Con este sensor se obtiene una señal que identifica el contraste entre la impresión y el fondo, por lo que se tiene una señal de dos estados (claro y oscuro).

Los cilindros neumáticos no cuentan con realimentación, debido a que son de dos posiciones y con la señal enviada a la electroválvula y la lógica de accionamiento se puede determinar la posición actual.

El motor apilador es un motor CD regulado manualmente por el operario, pero habilitado por el control. A diferencia del motor de las fajas su velocidad no se regula por medio del controlador.

El inhibidor de estática se habilita durante la producción mediante una señal digital proveniente del controlador.

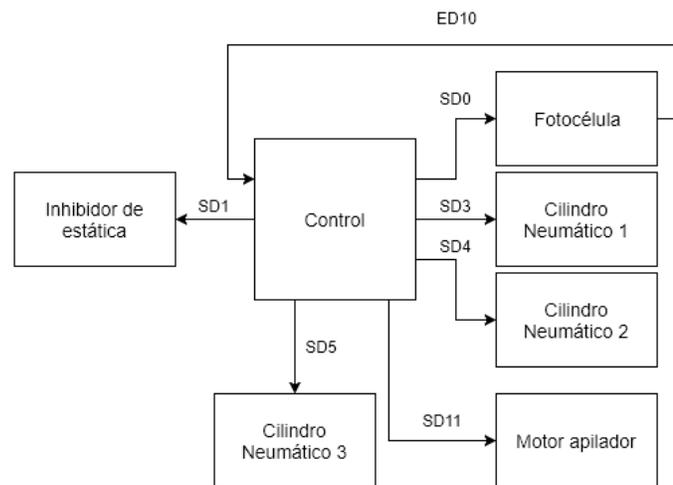


Figura 3.7. Señales de control para accesorios y fotocélula

### 3.8 Señales de control

En la tabla 1 se resumen las entradas y salidas que se requieren para controlar todos los elementos del proceso. Se les asigna un identificador a todas las señales para referenciarlas en los diagramas.

La lógica de conexión en la máquina es PNP, así entonces se muestra en la tabla para entradas y salidas digitales el nivel máximo de tensión (1 lógico), considerando que el mínimo son 0 V (0 lógico).

Se elige una señal de 4 a 20 mA como salidas analógicas. No obstante, es importante aclarar que el servoamplificador y los variadores de frecuencia que reciben estas señales tienen la opción de recibir también una señal de tensión como referencia de -10 a 10 V o 0 a 10 V respectivamente.

Tabla 3.1. Resumen de señales de entrada y salida requeridas para el control

Identificador	Descripción	Rango (Valor)	Unidades
Salidas Analógicas			
SA1	Señal analógica referencia de variador de frecuencia conectado a cabezal	4 a 20	mA
SA2	Señal analógica referencia de variador de frecuencia conectado a fajas	4 a 20	mA
SA3	Señal analógica para referencia del servoamplificador	4 a 20	mA
Salidas Digitales			
SD0	Habilita fotocélula	24	V
SD1	Habilita inhibidor de estática	24	V
SD2	Freno del cabezal	24	V
SD3	Cilindros 1 (compensación)	24	V
SD4	Cilindros 2 (compensación)	24	V
SD5	Cilindros 3 (Ponchador)	24	V
SD6	Cilindros 4 (Cabezal)	24	V
SD7	Habilita motor <i>desbobinador</i>	24	V

SD8	Habilita servoamplificador	24	V
SD9	Habilita VFD de cabezal	24	V
SD10	Habilita VFD de fajas	24	V
SD11	Habilita VFD de apilador	24	V
Entradas Digitales			
ED0	Canal A decodificador óptico del servoamplificador	24	V
ED1	Canal B decodificador óptico del servoamplificador	24	V
ED2	Canal Z decodificador óptico del servoamplificador	24	V
ED3	Canal A decodificador óptico cabezal	24	V
ED4	Canal B decodificador óptico cabezal	24	V
ED5	Canal Z decodificador óptico cabezal	24	V
ED6	VFD motor <i>desbobinador</i> activo	24	V
ED7	Servoamplificador activo	24	V
ED8	VFD de motor del cabezal activo	24	V
ED9	Variador de frecuencia de motor en fajas activo	24	V
ED10	Señal de la fotocélula	24	V
ED11	Paro forzado	24	V

## Capítulo 4 Control de los elementos de la máquina

### 4.1 Sincronización de los elementos

Para el diseño de la sincronización de los elementos se modeló el sistema mediante dos graficet, que muestran todos los estados que se consideraron para el proceso. Este modelo se realizó con base en los manuales de la máquina [13], [14] y observaciones de la máquina en producción. Así entonces el diseño está basado en el funcionamiento actual, pero con diferencias en algunas señales, referencias, simplificaciones, entre otros.

Los requerimientos indispensables que se identificaron para modelar el proceso se citan a continuación:

- a. Debe contar con un paro parcial.
- b. Al detener la máquina debe moverse el cabezal hasta la posición cero.
- c. Fococélula se debe activar si bolsa tiene impresión, si no se debe omitir.
- d. Al detener la máquina, si no es por emergencia, se debe girar servomotor hacia atrás una pequeña distancia.
- e. Debe omitirse la acción del cilindro ponchador dependiendo de la configuración del operador.
- f. Servomotor debe funcionar únicamente dentro de una ventana establecida. Esto para evitar que se esté transportando material cuando el cabezal va a hacer un corte de la bobina.
- g. De acuerdo al tamaño de la bolsa debe hacerse el cálculo para que se pueda transportar la distancia requerida en la ventana establecida.
- h. La condición de parada será diferente dependiendo de si se tiene una impresión en la bolsa o no.
- i. Cilindros de la sección compensadora mantienen el material de la manera adecuada y se activan o desactivan de acuerdo al movimiento del transporte del material. El cambio de estado se da primero en el cilindro superior y luego en el inferior.
- j. Incluir condición con una entrada externa de paro forzado, que detiene todos los elementos independientemente del estado actual.

El graficet de la figura 4.1 es el control maestro con el que se puede manejar el inicio y fin del proceso, así como el paro total (PT). En el estado 27 se detienen todos los elementos del sistema, y se presenta al cumplirse la condición PT o la condición de fallo en elemento, donde se considera el estado de todos los dispositivos que cuentan con la señal para indicar un funcionamiento correcto (*desbobinador*, *servoamplificador*, *cabezal* y *fajas*).

La acción del estado 27, que indica G0 en estado 25 señala que el diagrama de la figura 4.3 se ubica en el bloque 25 del proceso. Este estado prepara el sistema para detenerlo definitivamente. Cuando el operario inicia el proceso el sistema se ubica en el estado 26.

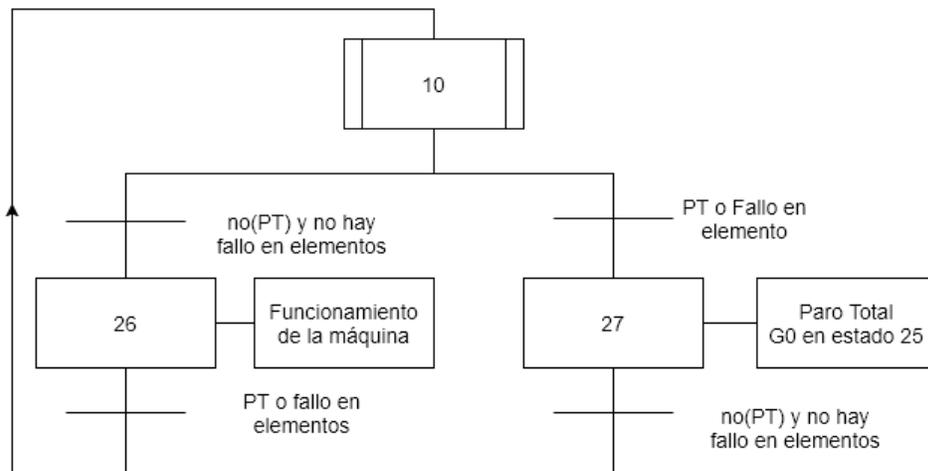


Figura 4.1. Graficet de control maestro

En la figura 4.3 el graficet muestra el proceso que se ejecuta en el estado 26. El ángulo se refiere a la posición del cabezal. Esto es debido a que el eje es excéntrico, por lo que se puede determinar un ángulo según la posición en el ciclo de una revolución del motor. La posición cero se refiere al cabezal en la parte superior.

La condición X26 se refiere al estado 26 del control maestro, es decir si la máquina está en funcionamiento o no. Las acciones son memorizadas por lo que no cambia el estado de los

componentes activados o señales enviadas hasta que se indique explícitamente. La condición PP indica un paro parcial; esto quiere decir que el operario detiene la producción brevemente, pero hay elementos que continúan funcionando, como la unidad de temperatura o las fajas.

Se indica con algunos bloques los estados en los que se pueden recibir parámetros de configuración por parte del operario; específicamente en los estados 0 y 20.

En el estado 1 se habilitan la mayoría de los elementos. Los elementos que dependen del estado del proceso inician función hasta que se cumpla una condición en los siguientes estados. En el estado 2 se habilita la fotocélula si así lo ha configurado el operario.

El módulo de temperatura se ejecuta en paralelo a todo el resto del proceso, como se ve en los estados 22 y 23, y solo se detiene en un paro total.

Como se indicó anteriormente la condición PP se refiere a un paro parcial, y con base en esto se avanza a los estados 4 o 19. En un paro parcial se debe girar el servomotor hacia atrás una distancia de seguridad, para evitar que la bobina de polietileno permanezca cerca de las resistencias calefactoras. Posteriormente se deshabilitan solo los dispositivos correspondientes.

Cuando no se encuentra en paro parcial (no(PP)) se avanza al estado 4, y a partir de este punto el funcionamiento es dependiente del ángulo del eje del cabezal. El concepto del ángulo del eje se ilustra en la figura 4.2.

De esta forma cada dispositivo se puede asociar con un ángulo, donde toda el área de actuación es un ciclo del cabezal. El funcionamiento de esta forma hace que las relaciones entre los componentes se mantengan independientemente de la velocidad a la que opera la máquina [13].

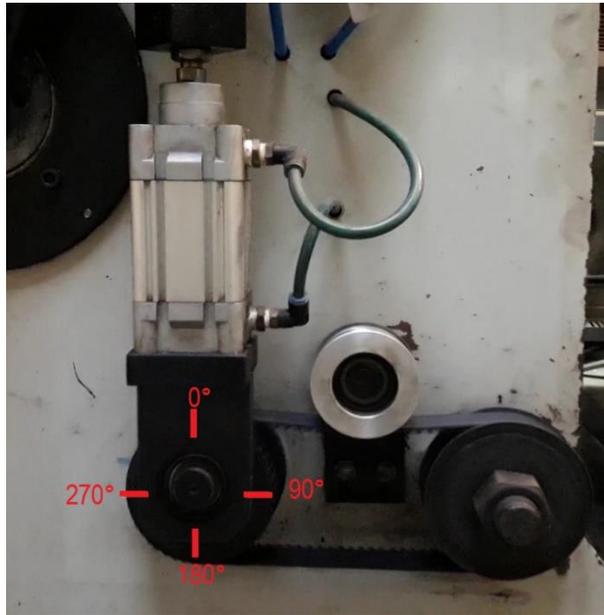


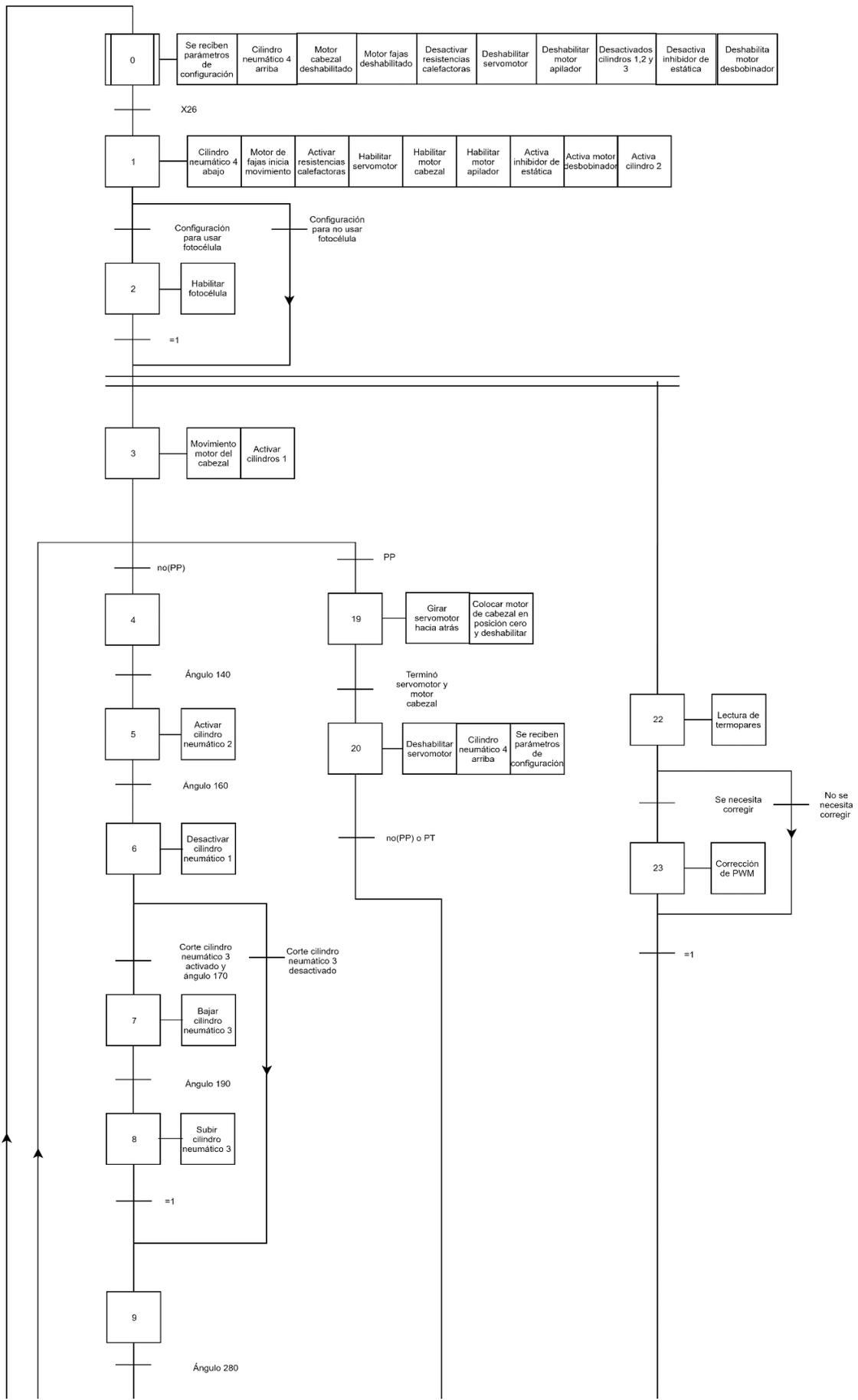
Figura 4.2. Ilustración de ángulos en eje del cabezal

La condición para la acción de los elementos es entonces la posición del cabezal en determinado momento. De esta forma una revolución del motor del cabezal indica un corte, ya que se realiza en el punto más bajo ( $180^\circ$ ). Por lo tanto, se produce una bolsa por revolución, y los demás componentes actúan dentro de esta ventana de tiempo.

El control específico de cada dispositivo se detalla más adelante, pero en la figura 4.3 se muestra el momento en que entran en funcionamiento.

La condición de la fotocélula establece el tipo de movimiento que se aplica sobre el servomotor. Si está activada se mueve hasta la lectura del sensor, dando una distancia de seguridad para detenerlo de mejor manera y también considerar el deslizamiento en el transporte. Si no, se mueve con base en un cálculo con el tamaño de la bolsa y los cortes por minuto programados.

Al llegar al estado 24, si la producción continúa, vuelve a iniciar el proceso con una nueva revolución, ya que el motor del cabezal se mantiene en movimiento de manera continua. En caso del paro total, en el estado 25 se hacen los ajustes necesarios para detener, a menos que se encuentre en paro parcial, en cuyo caso se omite este estado para no repetir acciones.



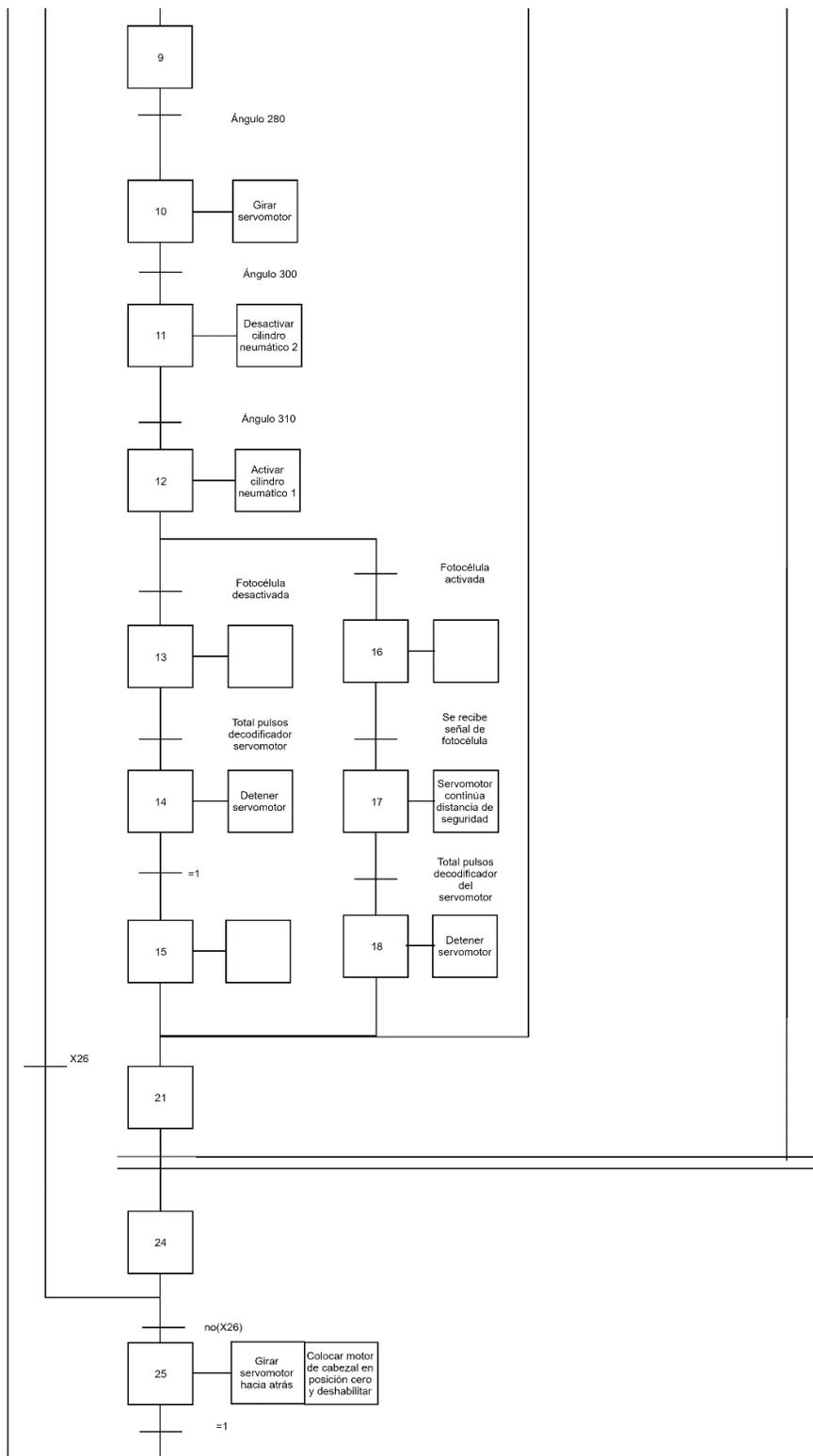


Figura 4.3. Grafcet nivel 2 del modelado del proceso

## 4.2 Control de motor con variador de frecuencia

El motor *desbobinador*, el del cabezal y el de fajas cuentan con un variador de frecuencia para controlar la velocidad. A través de este dispositivo el controlador principal puede operar de manera adecuada estos motores.

En el caso del motor del cabezal, la velocidad está dada por los cortes por minuto que deben ser efectuados según la indicación del operario. Es de esta manera, ya que como se señaló previamente, una revolución del motor principal es un corte en la bobina de polietileno. Este parámetro siempre se solicita, independientemente del tipo de bolsa que se produzca. Por lo tanto, en el controlador se debe asignar en revoluciones por minuto (rpm) directamente el valor de cortes por minuto, considerando también la pericia de quien manipula la máquina, para que no introduzca valores que excedan la capacidad.

Se requiere hacer entonces la conversión de cortes por minuto al dato decimal que se envía al módulo de salidas analógicas para obtener la señal deseada. De acuerdo a la figura 5.4 se debe obtener el valor de señal que se necesita a partir de la configuración del VFD para calcular el valor hexadecimal necesario en el módulo de expansión.

El variador de frecuencia de los motores de fajas, cabezal y *desbobinador* son del mismo tipo. No obstante, puede variar el control dependiendo de la configuración de los parámetros. En el caso de los motores de fajas y del motor principal, se estableció que la señal de control sea de corriente (4 a 20 mA). En el caso del motor *desbobinador* se mantiene con tensión, pues responde a la entrada de unos sensores y el control únicamente debe activarlo.

## 4.3 Control motor del cabezal

El variador de frecuencia Danfoss VLT Micro se puede configurar para obtener una curva de velocidad lineal en función de la señal analógica de entrada, siendo esta la configuración más común para este dispositivo. Además, como se ve en la figura 4.4 el rango de velocidad se escala para que coincida siempre con la señal analógica [5].

En la figura 4.4, el valor de 20 mA siempre corresponde al valor de máxima frecuencia (parámetro P03 del VFD) y 4 mA a la mínima (parámetro P08 del VFD).

Basados en esta curva se puede obtener la ecuación que relaciona la corriente con la velocidad, dada por la ecuación 4.1. En esta ecuación, las variables a considerar son la velocidad máxima del motor y el rango del módulo de salidas analógicas, puesto que se tendrá la mayor velocidad en la frecuencia máxima. En la ecuación 4.1,  $X_{m1}$  es la señal en rpm. El denominador de la pendiente está vinculado a la velocidad máxima que se puede obtener del motor y el numerador está ligado a la resolución del controlador para una señal analógica.

Debido a que el motor del cabezal es el principal, todos los demás elementos se asocian a su estado, y por esto no se requieren cálculos adicionales.

$$S_1 = \frac{6000}{1720} X_{m1} \quad (4.1)$$

De esta manera para el motor principal se aplica la ecuación 4.1 para encontrar el dato en decimal  $S_1$ , con base en el parámetro de cortes por minuto, que es equivalente a la velocidad. El parámetro  $S_1$  representa en un valor decimal la señal analógica que envía el controlador.

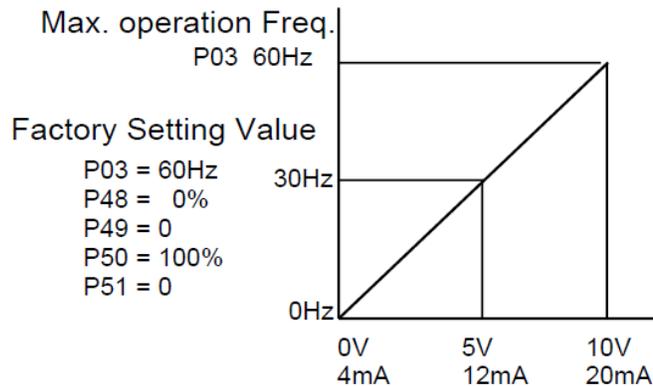


Figura 4.4. Curva de velocidad en función de la entrada (configuración más común) [5]

#### 4.4 Control motor de fajas

El control del motor de fajas es similar al del motor del cabezal, puesto que funcionan con el mismo variador de frecuencia. Por lo tanto, la respuesta que se obtiene es igual a la de la figura 4.4. Considerando que el movimiento de este motor no es dependiente de ningún otro proceso la ecuación también es similar al del motor del cabezal, según se muestra en la ecuación 4.3. De la misma forma el denominador de la pendiente se debe a la máxima del motor y el numerador está asociado a la resolución del controlador.

Esta velocidad será programada por el operador y el control realiza la conversión para enviar la señal analógica que se requiere, a través del módulo respectivo.

$$S_2 = \frac{6000}{830} X_{m2} \quad (4.2)$$

#### 4.5 Control del servomotor

El servoamplificador se puede configurar para tener una señal de corriente como referencia. El rango de operación va de -10000 a 10000 rpm correspondiente a la señal de entrada de manera lineal. Dado que el servomotor es de 3000 se hace uso de la ganancia y el offset del servoamplificador, los cuales son parámetros programables, para ajustar la señal a este rango [3]. De esta manera se limita el funcionamiento de -3000 a 3000 rpm.

Con ganancia y *offset* configurados el servoamplificador toma la señal y la escala para determinar el verdadero valor de operación. De esta manera se puede encontrar una ecuación para el proceso de manera similar a la obtenida para el variador de frecuencia. La ecuación 4.3 representa la conversión del servoamplificador, donde  $X_{m3}$  es la señal en rpm, y  $S_3$  es el parámetro en decimal equivalente al nivel de la señal analógica.

$$S_3 = X_{m3} + 3000 \quad (4.3)$$

En el caso del servomotor se tienen dos tipos de proceso dependiendo de si se usa la fotocélula o no. En el caso donde se usa la fotocélula se establece una velocidad constante al servomotor para el transporte, y el operario debe encargarse de verificar que el corte sea adecuado para la cantidad de bolsas por minuto que solicite. En este caso no se solicita el tamaño de la bolsa como un parámetro de configuración.

En el caso donde no se usa fotocélula se puede calcular la velocidad correcta del servomotor con los parámetros de bolsas por minuto y tamaño de la bolsa. Para esto se midió el tamaño de las ruedas dentadas del engranaje del servomotor y se calculó el avance de acuerdo con las ecuaciones 2.1 y 2.2.

Con esto se obtiene que el avance por revolución es de 21.991 cm. Este valor se aproxima a 22 cm, con un 0.041% de error, lo que es equivalente a 0.09 mm, que se considera despreciable.

Tomando los valores de tamaño de la bolsa y el volumen de producción, se sintetiza una ecuación de todo el proceso, que permite hacer el cálculo en el controlador para enviar el dato requerido por el módulo de expansión.

El cálculo se basa en el hecho de que el servomotor tiene una ventana de tiempo específica en la que puede funcionar, definida en el diseño entre  $280^\circ$  y  $130^\circ$  del ángulo del eje del cabezal. Dado que la velocidad del motor del cabezal es un dato conocido, se puede determinar el tiempo que dura en completar una revolución, y particularmente esta fracción definida para el transporte.

La longitud de la bolsa (en cm) también es un parámetro que debe ser indicado por el operador. De esta forma, conociendo que una revolución son 22 cm de avance, se puede conocer cuántas revoluciones del servomotor son necesarias para completar el tamaño señalado.

A partir de los datos que se obtienen con los cálculos recién indicados, se obtienen cantidad de revoluciones por unidad de tiempo (ventana de funcionamiento). La ecuación 4.4 presenta esta conversión, simplificando al máximo las constantes, donde  $V_{m3}$  es la velocidad requerida para el servomotor,  $L$  la longitud de la bolsa en cm y  $cpm$  son los cortes por minuto que se requieren.

$$X_{m3} = \frac{6}{77} \cdot L \cdot cpm \quad (4.4)$$

A partir de la ecuación 4.4 y 4.3, el valor obtenido para  $S_3$  se convierte al dato que se envía al módulo.

Adicional a esto se debe realizar el cálculo de cuentas que representan una distancia  $d$ . Esta distancia puede ser la longitud de la bolsa o la ventana de seguridad antes de detener el servomotor. Dado que el decodificador óptico es para el servomotor es de 1024 pulsos, y que la configuración en el PLC es lineal de fase diferencial, se tiene un total de 4096 cuentas por revolución, equivalente a 22 cm. Entonces la equivalencia para cualquier distancia  $d$  se puede determinar con la ecuación 4.5.

$$Cuentas\ totales_{HSC1} = \frac{4096}{22} d \quad (4.5)$$

#### 4.6 Control de temperatura

Para leer los valores de temperatura desde los sensores se requiere un módulo especial CJ1W-TC002, que permiten recibir entradas analógicas de los termopares tipo J, y ejecuta un control PID de dos grados de libertad [15].

El control PID se implementa con *autotuning*, que es una función disponible del módulo elegido, la cual calcula las constantes del PID con base en la lectura del proceso que realiza.

Para realizar el *autotunig* se sigue la lógica que se muestra en el diagrama de flujo de la figura 4.5. Esto es de acuerdo a la recomendación del manual para una configuración básica y actualización de constantes [15].

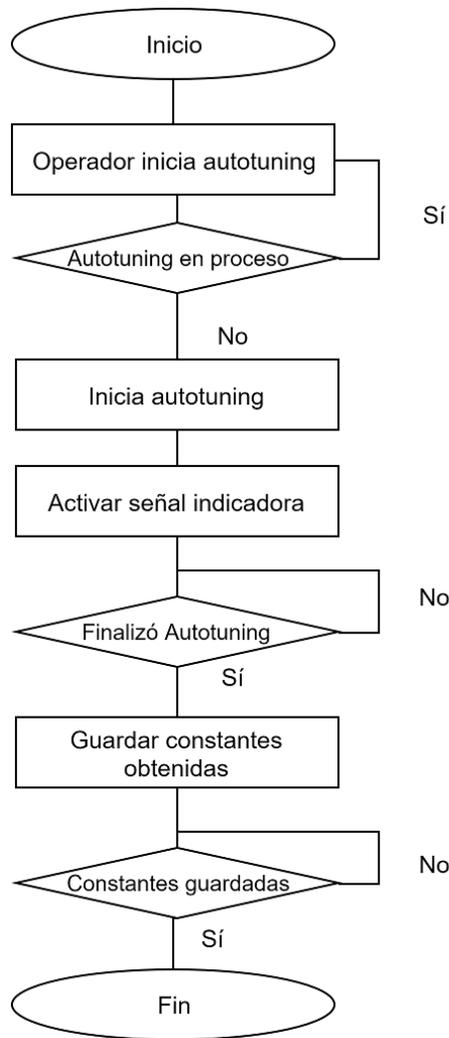


Figura 4.5. Diagrama de flujo proceso de *autotuning*

Luego de que se han establecido las constantes del PID, se puede iniciar el control de temperatura para el punto de referencia (SV) que ha establecido el operador. Para esto el control general, tal como muestra la figura 4.3, inicia el proceso en el estado 1. Posterior a esto el control de temperatura funciona de forma paralela a los demás elementos, lo que se representa en los estados 22 y 23, pero que ejecuta el módulo CJ1W-TC002.

## Capítulo 5 Programación del control y simulación

El controlador fue programado con el software CX Programmer, donde se incluyeron todas las condiciones señaladas en el capítulo anterior. Además, se utilizó el software CX Designer para la programación del panel gráfico, que permite la interacción con el operador y a la vez verificar el proceso por simulación.

### 5.1 Cálculo de posición del cabezal y transporte de servomotor

Para obtener los datos de los decodificadores ópticos se necesita leer las señales de los canales con dos contadores rápidos (HSC). El PLC CP1H cuenta con cuatro contadores de este tipo y se pueden configurar a través de la pantalla de ajustes del CX Programmer, que se muestra en la figura 5.1. El contador rápido 1 se utiliza para el decodificador óptico del servomotor y el contador rápido 2 para el decodificador óptico del cabezal.

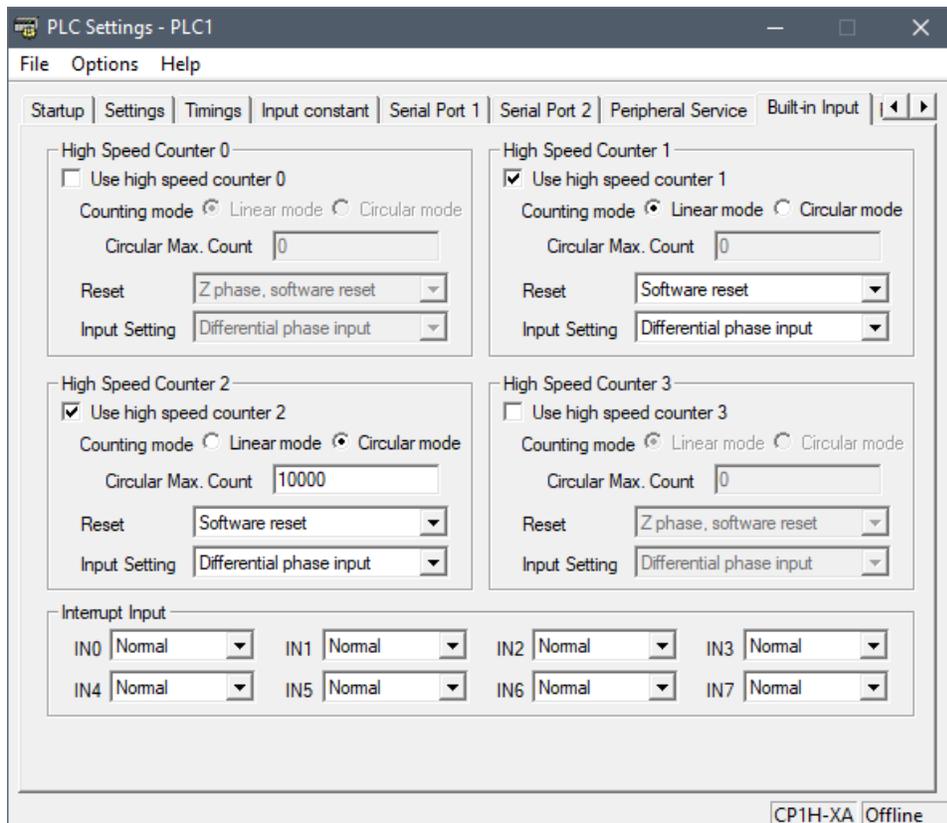


Figura 5.1. Pantalla de configuración para los contadores rápidos

En el caso del contador 1, el valor del contador se incrementa de manera continua según las entradas del decodificador óptico. Al ser de fase diferencial la lectura se hace de acuerdo a la figura 5.2. El reset es por software en el bit A531.01 y el valor actual se almacena en los espacios de memoria A272 y A273 [10]. En este caso no es necesario determinar una posición exacta, si no un recorrido total. Por esta razón se configuró de manera lineal, ya que el servomotor puede requerir más de una revolución para el transporte. Este valor se compara con el obtenido con el de la ecuación 4.5 para determinar si se ha cumplido el desplazamiento necesario.

En el caso del decodificador óptico del cabezal se configura el modo del contador en “anillo”, de esta manera el contador se reinicia automáticamente al completar una revolución. Su bit de reset es el A531.02, y su valor actual se encuentra en el espacio de memoria A316 y A317.

Debido a que este contador rápido está configurado en anillo se tiene que las 10000 cuentas obtenidas representan un círculo completo y se puede determinar los ángulos equivalentes, lo que es requerido para determinar la posición exacta del cabezal. El cálculo de la equivalencia entre cuentas y el ángulo se puede determinar con la ecuación 5.1.

$$Cuentas\ totales_{HSC2} = \frac{\text{Ángulo} \cdot 10000}{360} \quad (5.1)$$

Con esto se determina el valor que debe colocarse en los comparadores de las distintas etapas que tienen esta condición, según la figura 4.3. En la tabla 5.1 se detalla este aspecto.

Tabla 5.1. Equivalencia entre valor del contador y ángulo del cabezal

Etapa	Ángulo	Valor equivalente
4	140	3889
5	160	4444
6	170	4722
7	190	5278
9	280	7778
10	300	8333
11	310	8611
13	130	3611
13	280	7777*

\* Se utiliza dato menor a etapa 9 por condición en la programación.

## 5.2 Programación del control

El control se programó por etapas según se mostró en el graficet que describe el proceso. En la figura 5.2 se muestran todas las secciones que tiene la programación.

En la sección “Master” está programada la lógica que permite cambiar entre los estados de la figura 4.1. En esta se consideran las condiciones para detener la máquina ya sea por un fallo o por indicación del operador.

En la sección “Etapas” se programaron las condiciones que permiten al controlador cambiar el estado actual. Esto se realizó con variables internas que representan cada etapa y que se activan o desactivan en función de las condiciones presentes. Al programar estas transiciones en una sección se facilitó determinar alguna condición ambigua o que no siguiera el diagrama de la figura 4.3.

Las secciones siguientes representan todas las etapas del graficet. Se denominan “E\_X”, donde X es el número de etapa. En estas secciones se ejecutan las acciones requeridas y se evalúan las condiciones de transición.

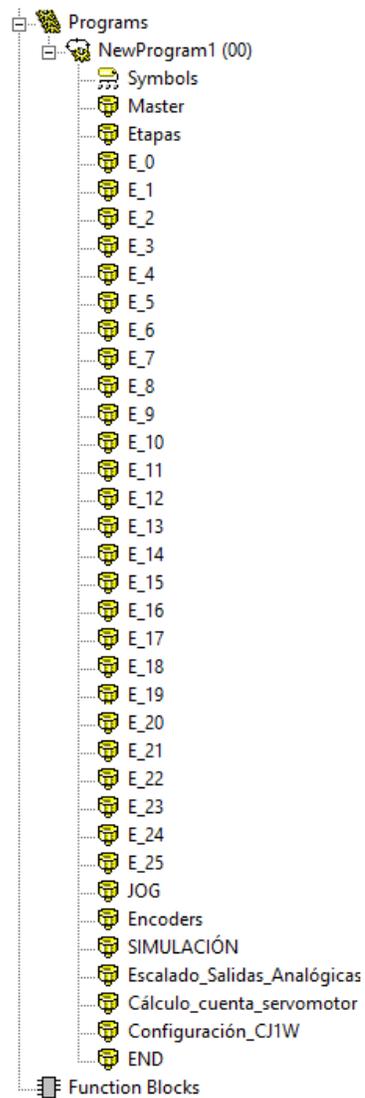


Figura 5.2. Secciones del programa para el controlador

La sección “JOG” permite al operario realizar un avance manual si la máquina no está detenida. Esto sirve para ajustar la posición del cabezal o la bobina de polietileno.

En la sección “Encoders” se leen los valores actuales de los contadores rápidos. Para el caso de la simulación esta etapa se deshabilita con un interruptor siempre apagado. Esto es debido a que no se cuentan con las señales de entrada. Esta parte se simuló con contadores dentro de la

programación, en la sección “SIMULACIÓN”. Esta sección se puede eliminar en una futura implementación, ya que no incide en ningún aspecto del control, y se utiliza solo con el fin de poder apreciar el funcionamiento de la máquina con algunas señales requeridas.

En la sección “Escalado\_Salidas\_Analógicas” se realiza el cálculo de las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4. El dato que se calcula en esta sección es enviado a cada motor en la etapa que corresponde.

La sección siguiente, “Cálculo\_cuenta\_servomotor”, corresponde al cálculo de la ecuación 4.5, donde se considera también si se está haciendo uso de la fotocélula o no.

Finalmente, la configuración que se muestra en la figura 4.5 se implementa en la sección “Configuración\_CJ1W”, considerando el proceso para cada lazo por separado. La activación o desactivación del control de temperatura se realiza en las etapas correspondientes a través de los bits 6 y 4 de la palabra  $D_{n+2}$  para los lazos 1 y 2, y el bit 6 de la palabra  $D_{n+12}$  para el lazo 3.

### **5.3 Panel gráfico**

En la figura 5.3 se muestra la pantalla principal del panel gráfico. Desde esta pantalla se puede realizar la configuración del proceso, y verificar por medio de los indicadores en la parte central el correcto funcionamiento del programa.

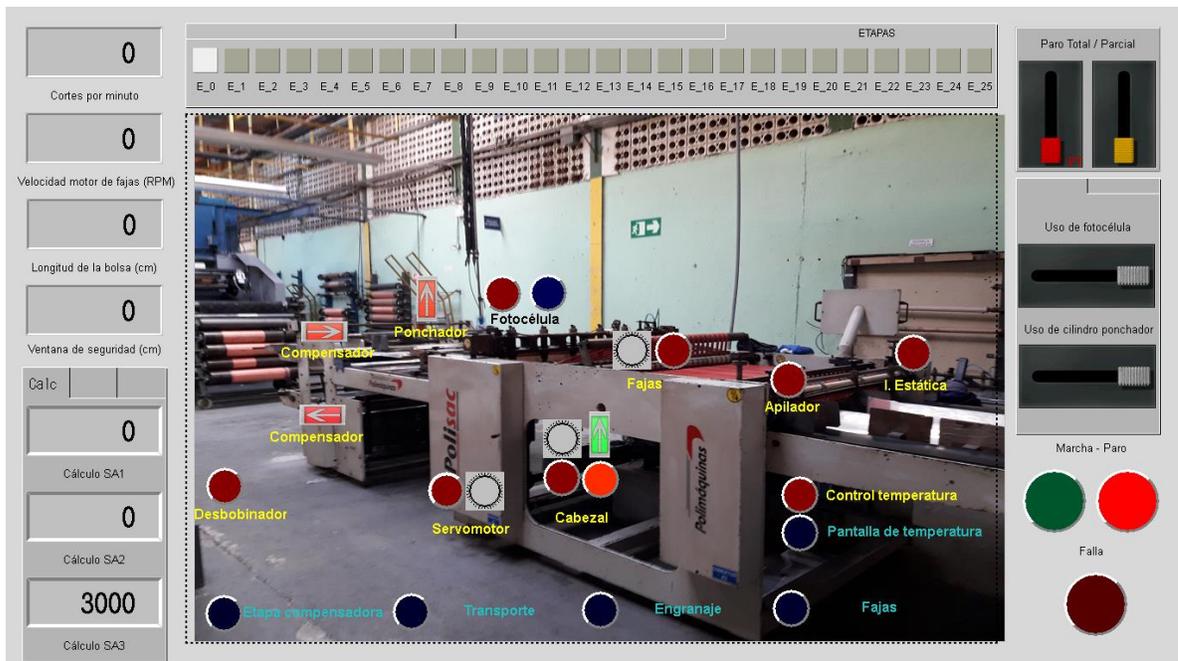


Figura 5.3. Pantalla principal del panel gráfico

En la parte superior izquierda se reciben los parámetros para los motores, como cortes por minuto, longitud de la bolsa, y ventana de seguridad. Estos datos son indicados por el operador antes de iniciar el proceso.

En el marco inferior izquierdo se puede cambiar la vista entre tres ventanas. En la primera se muestra el dato en decimal calculado y que corresponde a la señal analógica que se va a enviar. En la segunda se muestra el dato que en realidad se está enviando en ese momento. En la tercera ventana se muestra el valor actual del contador del cabezal y servomotor.

En la parte superior se tienen otras tres ventanas donde se observan las salidas del controlador, las entradas y la etapa actual. Con la vista de las etapas es más sencillo poder identificar que elemento presenta una falla o en que sección de la programación se debe hacer un ajuste si se considera necesario.

En la parte superior derecha se tienen los interruptores de marcha o paro total (PT) y paro parcial (PP). Debajo de estos se encuentra un marco con una ventana donde están los interruptores para activar el uso de fotocélula o el uso del cilindro ponchador, y en otra el avance manual.

Las luces de la parte zona inferior derecha muestran el estado de la máquina. Se tiene una luz verde si la máquina está en marcha, o roja si está activo el paro total. También se tiene una luz indicadora de falla, que se activa cuando se detecta esta condición en algún componente.

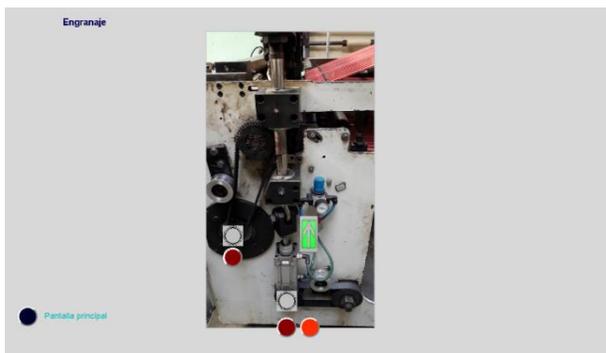
En la zona central se encuentran los indicadores que permiten visualizar en la máquina el funcionamiento de los dispositivos, lo que permite comprobar los requerimientos de diseño en diferentes condiciones. Se cuenta con botones de acceso a otras cuatro pantallas donde se detalla cada parte de la máquina, para poder apreciar de mejor manera a qué corresponde cada indicador. Estas pantallas se muestran en la figura 5.4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.4. Pantallas secundarias (a) Compensación (b) Intermedia (c) Engranaje (d) Fajas

También se cuenta con una pantalla para la configuración del control de temperatura, la cual se muestra en la figura 5.5. Esta pantalla permite realizar el *autotuning* para cada lazo de control, así como programar la temperatura deseada. Cuenta con luces indicadoras para señalar cuando se está ejecutando el *autotuning* y cuando está el control activo.

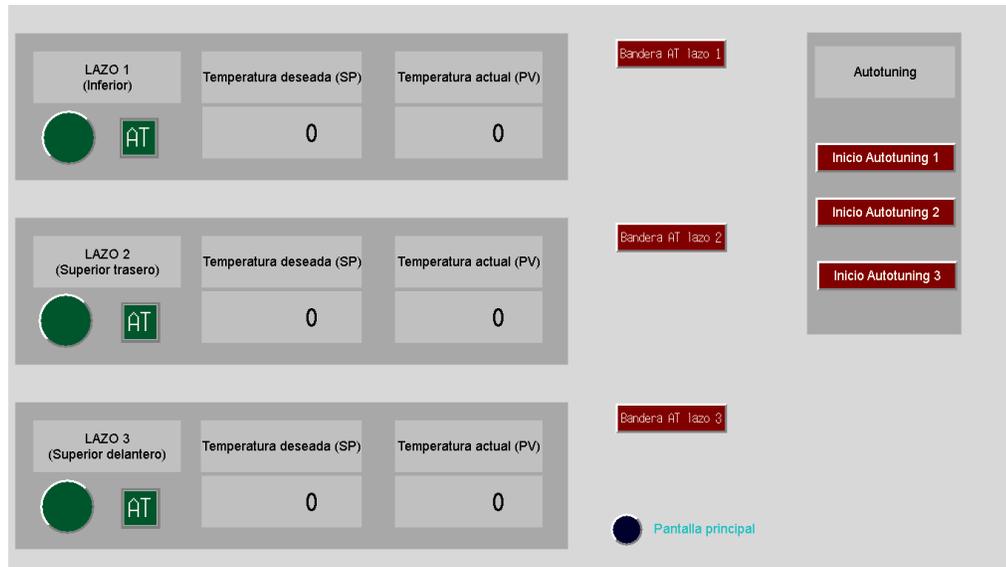


Figura 5.5. Pantalla para configuración de temperatura

## 5.4 Simulación

Para comprobar el funcionamiento correcto del programa se establecieron 4 pruebas con base en el funcionamiento normal de la máquina, y que a la vez permiten corroborar que se cumplen todas las condiciones de transiciones entre etapas de manera adecuada, y además que el resultado es el esperado en términos de sincronización de los componentes.

Este tipo simulación tiene la limitante de que no se efectúa a la velocidad real de la máquina, por capacidad de la computadora e implementación de señales como los contadores. Sin embargo, esto no es relevante para probar que las condiciones más importantes se cumplen, pues como se aprecia en el diagrama donde se modeló la operación de la máquina, las condiciones de transiciones entre

etapas y activación de los componentes no dependen de la velocidad, sino de estados de señales digitales y principalmente de la posición del cabezal, que se determina por el ángulo. Incluso la máquina en la producción real, puede funcionar a diferente velocidad dependiendo del volumen de producción y tamaño de la bolsa. Por lo tanto, al cumplirse las condiciones en la simulación, se deben cumplir para cualquier velocidad de funcionamiento real.

De igual manera, al simularse el valor de los contadores se establece un valor menor del número total de cuentas, esto con el fin de reducir el tiempo de simulación. Esto no afecta la lógica del programa, pues simplemente es una variación a los datos reales que se mostraron en la tabla 5.1. Los datos para la simulación se muestran en la tabla 5.2, debido a que se estableció el número máximo de cuentas en 1000 en lugar de 10000.

Tabla 5.2. Equivalencia entre valor del contador y ángulos para simulación

Etapa	Ángulo	Valor equivalente
4	140	389
5	160	444
6	170	472
7	190	528
9	280	778
10	300	833
11	310	861
13	130	361
13	280	777*

\* Se utiliza dato menor a etapa 9 por condición en la programación.

No obstante, se debe aclarar que puede existir una limitación física que impida cumplir la producción con ciertos parámetros indicados, por ejemplo, una bolsa muy grande a una velocidad muy alta. Por lo tanto, se debe considerar también que el operador debe tener la pericia para establecer una configuración factible.

Para garantizar el correcto funcionamiento se establecen condiciones de configuración de la máquina, así como el resultado esperado en cada prueba con base en lo que se observó en el proceso y que se determinó en el diagrama de la figura 4.3.

Considerando la resolución de las señales analógicas, el error por redondeo en los cálculos es de 0.14 rpm para el motor del cabezal, 0.07 rpm para el motor de fajas y 0.5 rpm para el servomotor. Estos valores se considera que no afectan el correcto funcionamiento de la máquina.

También se debe considerar que en el panel gráfico se marcó con azul oscuro la zona donde no debe operar el servomotor. Esto permite verificar que solo trabaje en la ventana definida.

En las pruebas se adjuntan imágenes de algunos de los datos principales de la simulación, sin embargo, se pudo revisar que se cumplieran todas las condiciones esperadas.

#### 5.4.1 Prueba 1

Condiciones: 60 cortes por minuto, velocidad de fajas 100 rpm, longitud de la bolsa 30 cm, sin uso de fotocélula, sin uso de cilindro ponchador y con paro parcial al final del proceso.

Aplicando la ecuación 4.4 y 4.3, se obtiene que se envía un dato al servomotor de 3140:

$$X_{m3} = \frac{6}{77} \cdot 30 \cdot 60 = 140.25 \approx 140$$

$$S_3 = X_{m3} + 3000 = 3140$$

Según la ecuación 4.1 el dato en decimal para el motor del cabezal es de 209:

$$S_1 = \frac{6000}{1720} \cdot 60 = 209.03 \approx 209$$

De acuerdo con la ecuación 4.2 para el motor de las fajas, el dato que se debe enviar es de 230:

$$S_2 = \frac{6000}{830} \cdot 100 = 722.89 \approx 723$$

En la figura 5.6 se muestra como los datos obtenidos coinciden con los esperados, y en general en el resto del proceso las transiciones entre etapas fueron correctas.

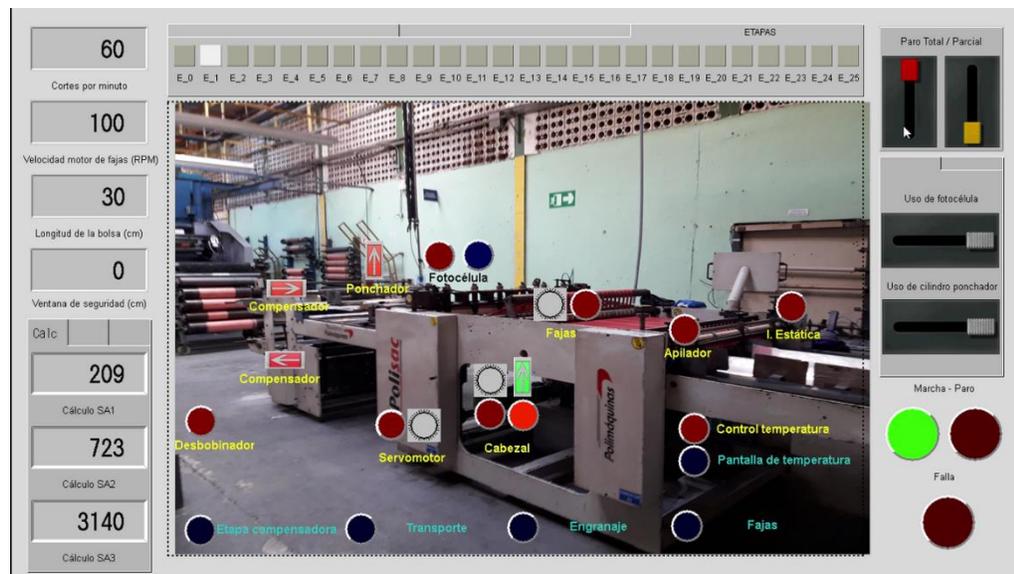


Figura 5.6. Datos de simulación prueba 1

#### 5.4.2 Prueba 2

Condiciones: 21 cortes por minuto, velocidad de fajás 100 rpm, longitud de la bolsa 75 cm, sin uso de fotocélula, sin uso de cilindro ponchador y con paro por una falla en algún elemento.

Con un cálculo similar a la prueba anterior se encuentra que el dato esperado para el servomotor es de 3122. Para el motor del cabezal es de 73 y para el motor de fajás es de 723. Esto se corrobora en la figura 5.7.



Figura 5.7. Datos de simulación prueba 2

Además, en esta prueba se corroboró el proceso al detectarse una falla, obteniéndose los resultados esperados. En la figura 5.8, se muestra cómo se apaga una entrada digital, por lo que se enciende la luz de falla, y se desactivaron los elementos.

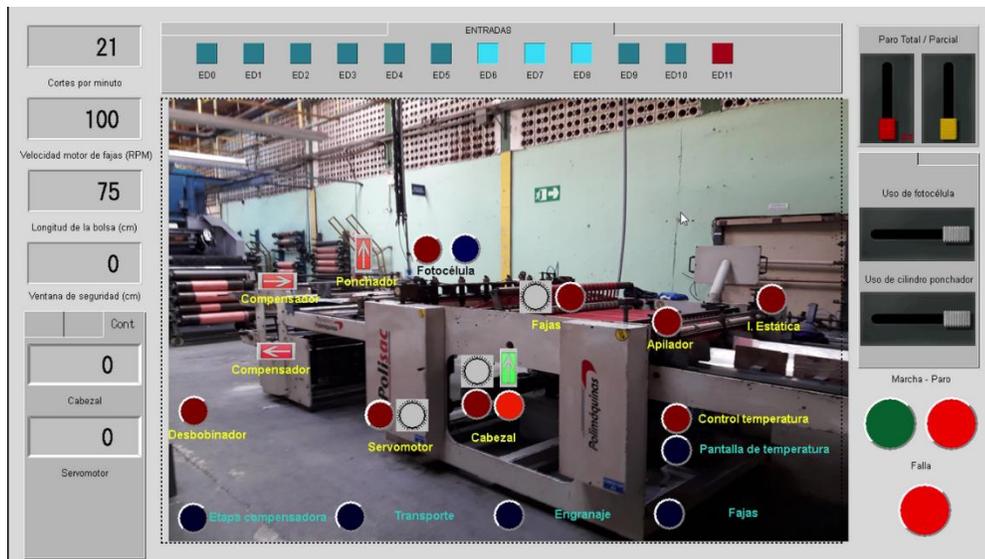


Figura 5.8. Prueba de proceso de falla

### 5.4.3 Prueba 3

Condiciones: 30 cortes por minuto, velocidad de fajas 50, longitud de la bolsa 50 cm, ventana de seguridad 1 cm, uso de fotocélula, uso de cilindro ponchador, paro parcial para finalizar proceso y luego paro total.

En esta prueba principalmente se busca corroborar el adecuado proceso de la fotocélula y cilindro ponchador. En la figura 5.9 se observa como el cilindro ponchador se activa en la etapa 7, tal como se espera según el diagrama del proceso.

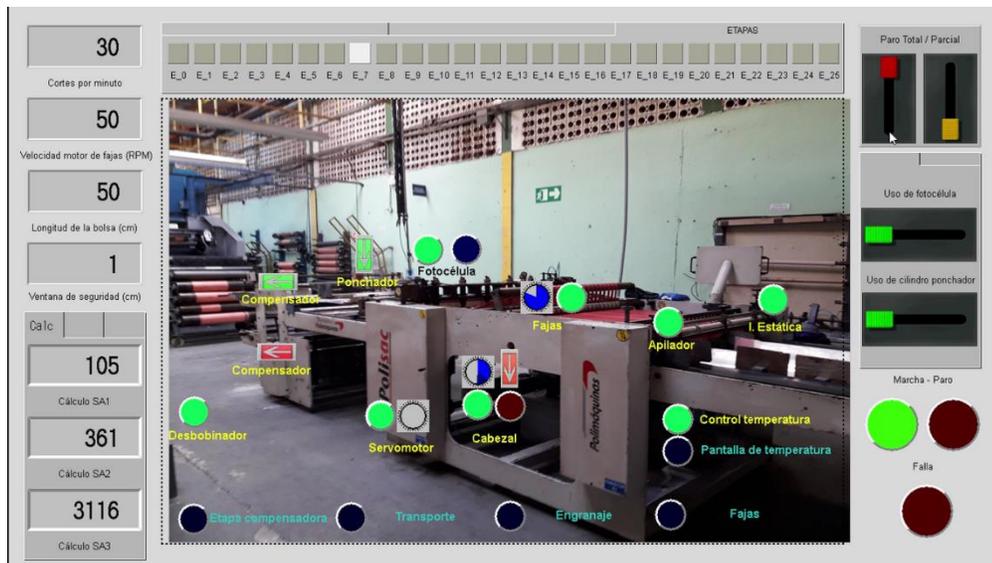


Figura 5.9. Activación de cilindro ponchador en prueba 3

El otro aspecto importante es que cumpla las etapas 16, 17 y 18, correspondientes a una bolsa con impresión. En la figura 5.10 se muestra la espera por la distancia definida luego de la lectura de la fotocélula.

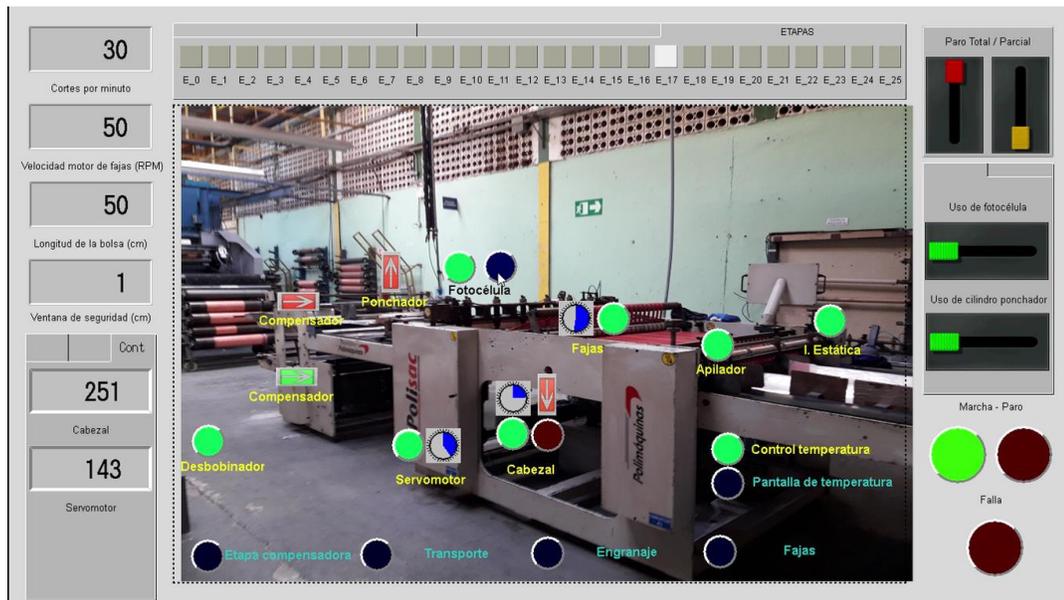


Figura 5.10. Uso de fotocélula en prueba 3

#### 5.4.4 Prueba 4

Condiciones: 30 cortes por minuto, velocidad de fajas 60, longitud de la bolsa 2 cm, sin uso de fotocélula, uso de cilindro ponchador y paro total directamente para detener el proceso.

Debido a la velocidad de simulación con tamaños grandes de bolsa el servomotor se detiene por el fin de la ventana de operación. En esta prueba se usa como prueba una distancia de 2 cm para verificar que el cálculo y la lectura de la distancia recorrida es correcta.

En la figura 5.11 se muestra como el servomotor ya se detuvo, aunque la máquina aún se encuentra la ventana de operación para el transporte, pues se cumplió la distancia definida.

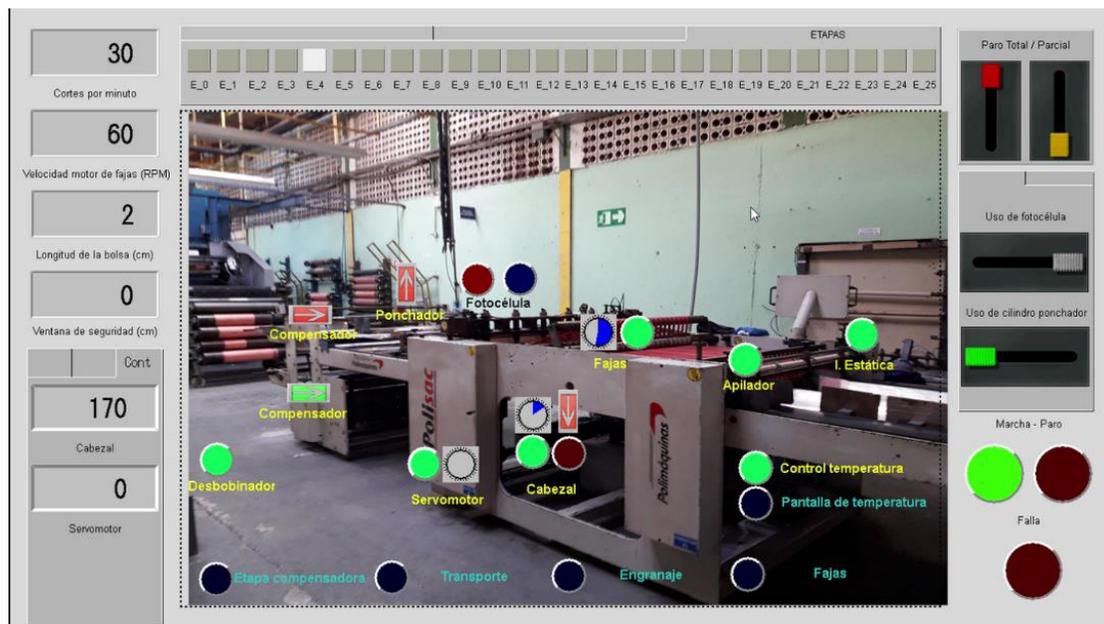


Figura 5.11. Simulación de fin de transporte en prueba 4

También se verificó el proceso en caso de que se seleccione directamente un paro total en la marcha (no desde un paro parcial). En la figura 5.12 se muestra cómo se ejecuta la etapa 25. El 2950 indica un giro hacia atrás del servomotor, al ser menor a 3000.

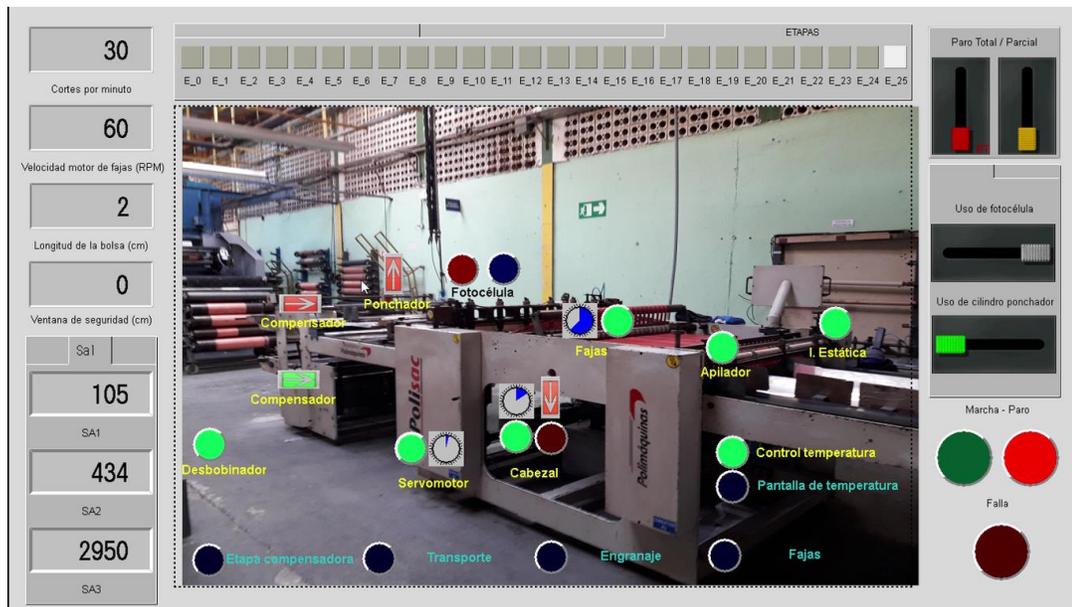


Figura 5.12. Simulación de paro total de la marcha en prueba 4

## Capítulo 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

Modelar el proceso en función de la posición del cabezal garantiza que la máquina actúe de la manera esperada para cualquier tipo de bolsa y cantidad de cortes por minuto requeridos, dando más libertad al operador para programar los datos que considere apropiados, con base en las necesidades de la producción.

Con las observaciones al proceso en la elaboración de distintos tipos de bolsas, se determinó que las condiciones incluidas en el diseño son suficientes para poder satisfacer la producción.

Con las ecuaciones obtenidas para el motor del cabezal y el servomotor se puede verificar que la salida obtenida es la esperada dependiendo de los valores de la configuración. Esto es importante ya que permite corroborar el diseño en la simulación. Igualmente, estas ecuaciones pueden ser la base para una implementación con otro controlador si se quisiera.

El servomotor, es el componente cuyo control es más crítico, pues depende de más variables externas, cálculos y estados de la máquina.

La programación del control por etapas permite que sea más sencillo para otro colaborador identificar la sección en la que deba hacer algún ajuste si fuese necesario. Asimismo, garantiza la continuidad de la secuencia, evitando estados ambiguos según las condiciones del proceso, ya que se pueden identificar y corregir de mejor manera.

Con la programación del panel gráfico se mejoró la interacción con el usuario, y además se comprobó por medio de la simulación que los estados del proceso se cumplen de acuerdo a la configuración establecida.

## 6.2 Recomendaciones

Si al implementar se considera favorable que el servomotor finalice el transporte en menos tiempo conservando la ventana de funcionamiento establecida, se puede incrementar ligeramente el valor de rpm calculado. Esto con el fin de que el transporte no finalice en el límite del rango de operación.

Se recomienda asegurarse de la concordancia entre los tipos de datos de las funciones del CX Programmer, y en la medida de lo posible utilizar el mismo en la mayor parte de los cálculos. Revisar adecuadamente el tipo de dato que se debe introducir si es necesario cambiar alguna constante, pues algunas funciones solo manejan BCD, binario o flotante.

Utilizar la pantalla de símbolos del programa para verificar todas las condiciones de los contactos, y modificar si se quiere su nombre o ubicación en memoria. Con esto se garantiza que se actualicen en todas las secciones del programa.

Asegurarse de reprogramar los variadores de frecuencia y el servoamplificador para que su funcionamiento concuerde con el de este control.

Asegurarse que los decodificadores ópticos, y en general todos los elementos que necesitan alimentación adicional, tengan el nivel de tensión adecuado para para el PLC al implementar.

## Referencias

- [1] Yaskawa America. (2014, 4 de abril). Servo Basic Concepts. [Archivo de video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=t0dSaugIXF8>
- [2] Ormec, *Encoder vs. Resolver-Based Servo Systems*. Disponible en: <http://www.ormec.com/Portals/0/files/Services/Applications/ApplicationNotes/EncoderVsResolver.pdf>
- [3] *Servodrive Manual SCA-05*, WEG. Disponible en: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/1-16934.pdf>
- [4] ABB. (s.f.). *Qué es un variador de frecuencia: Definición, cómo funciona, características y ventajas*. Disponible en: <http://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- [5] *Danfoss VLT Micro Manual*, Danfoss. Disponible en: [drives.danfoss.us/workarea/downloadasset.aspx?id=17179911527](http://drives.danfoss.us/workarea/downloadasset.aspx?id=17179911527)
- [6] Omega. *Thermocouples*. Disponible en: <http://www.omega.co.uk/prodinfo/thermocouples.html>
- [7] A. Creus. *Neumática e hidráulica*. Barcelona, ES: Marcombo, 2007. Disponible en: ProQuest ebrary.
- [8] *WM03PCT2 Operating Instructions*. Wenglor. Disponible en: <https://www.wenglor.com/index.php?id=564&L=4>
- [9] *CP series CP1H CPU Unit*, Versión P080-E1-02. OMRON. Tokyo, Japón. 2012. Disponible en: [https://industrial.omron.mx/en/media/CP1H\\_datasheet\\_en\\_201505\\_P080-E1-02\\_tcm871-109490.pdf](https://industrial.omron.mx/en/media/CP1H_datasheet_en_201505_P080-E1-02_tcm871-109490.pdf)
- [10] *CP1H CPU Unit, Operation Manual*, Versión W450-E1-07. OMRON. 2010. Disponible en: [https://industrial.omron.mx/en/media/CP1H\\_OpMan\\_EN\\_201006\\_W450-E1-07\\_tcm871-109492.pdf](https://industrial.omron.mx/en/media/CP1H_OpMan_EN_201006_W450-E1-07_tcm871-109492.pdf)

- [11] Barrientos. A., Gambao, E. (2014). *Sistemas de producción automatizados*. Madrid, España: Dextra Editorial. Disponible en: ProQuest ebrary.
- [12] R, Dorf, R. Bishop. *Modern Control Systems*. Pearson, 12 ed, 2011.
- [13] *Manual de operación corte y soldadura*, Versión 1.01. Polimáquinas. São Paulo, Brasil. 2005.
- [14] *Polisac CS1100, Diagrama Eléctrico, Versión 00/06*. Polimáquinas. São Paulo, Brasil. 2005.
- [15] *CJ1W-TC, Temperature control units, Operation Manual.*, Versión W396-E1-03. OMRON, 2005. Disponible en: [https://industrial.omron.mx/en/media/W396-E1-03\\_CJ1W-TC\\_OperManual\\_tcm871-110047.pdf](https://industrial.omron.mx/en/media/W396-E1-03_CJ1W-TC_OperManual_tcm871-110047.pdf)

## **Apéndice A    Manual de operación y programación**

### **Introducción**

En este manual se describe los elementos principales con los que interactúa el controlador y se explica brevemente las bases del control diseñado. Además, se detalla cómo utilizar el panel gráfico desarrollado y se muestra como ajustar en la programación del PLC el parámetro que se consideró necesario.

Elementos necesarios:

1. PLC Omron CP1H-XA40DT1-D
2. Módulo de salidas analógicas CP1W-DA021
3. Módulo de control de temperatura CJ1W-TC002

### A1.1 - Elementos a controlar:

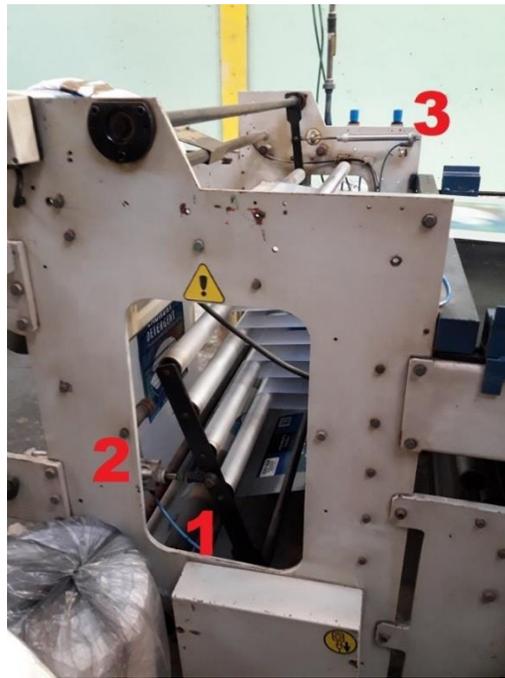


Figura A. 1. *Desbobinado y compensación*

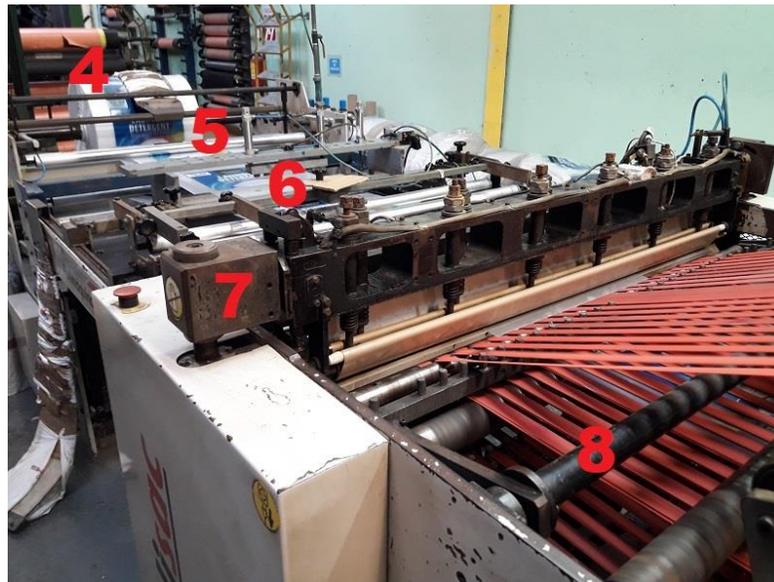


Figura A. 2. Ubicación de los elementos en la máquina

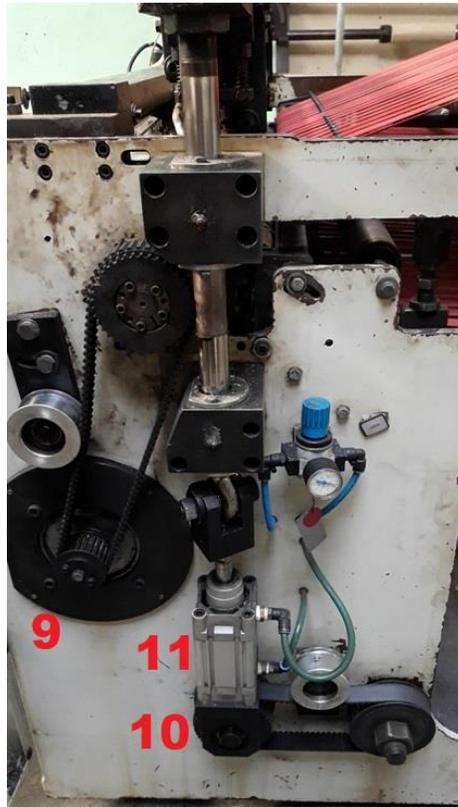


Figura A. 3. Engranajes

1. Desbobinador
2. Cilindro neumático 1 (compensación)
3. Cilindro neumático 2 (compensación)
4. Bobina de polietileno
5. Cilindro neumático 3 (ponchador)
6. Fococélula
7. Cabezal
8. Fajas
9. Engranaje servomotor
10. Engranaje motor principal (cabezal)
11. Cilindro neumático 4 (Eleva el cabezal)

## A1.2 - Principio de funcionamiento:

El proceso se modeló como un ciclo de 25 etapas (ver figura 4.3) donde se accede a cada una y se ejecutan ciertas acciones dependiendo de la configuración de la máquina.

Todos los elementos del proceso se sincronizan de acuerdo a la posición del motor principal de acuerdo a la referencia establecida, como se ve en la figura 4.

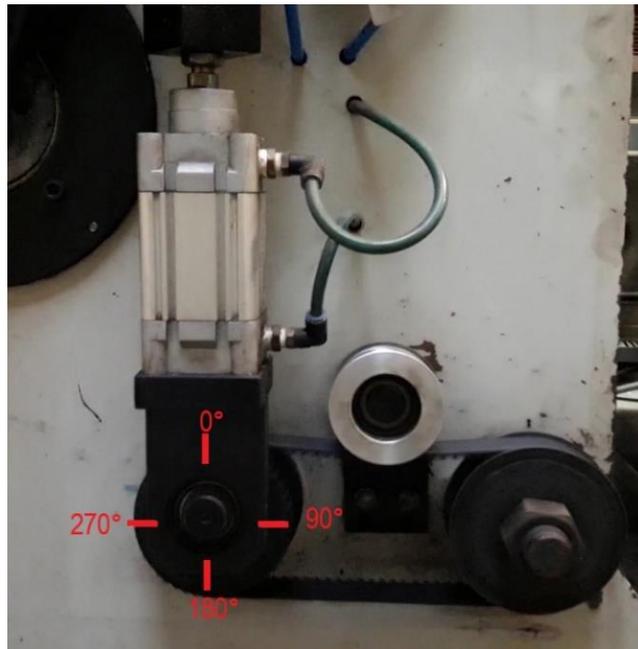


Figura A. 4. Detalle referencia de posición del motor principal

Con base en esto los demás componentes inician o finalizan su operación en un ángulo definido de acuerdo a la etapa del proceso, según se muestra en la tabla 1.

Tabla A. 1. Posición de referencia para cada etapa.

Etapa	Ángulo	Valor equivalente
4	140	3889
5	160	4444
6	170	4722
7	190	5278
9	280	7778
10	300	8333
11	310	8611
13	130	3611
13	280	7777*

\* Se utiliza dato menor a etapa 9 por condición en la programación.

### A1.3 – Panel gráfico

En la figura 5 se muestra la pantalla principal de configuración. Desde esta pantalla se puede configurar todo el proceso a excepción del control de temperatura.

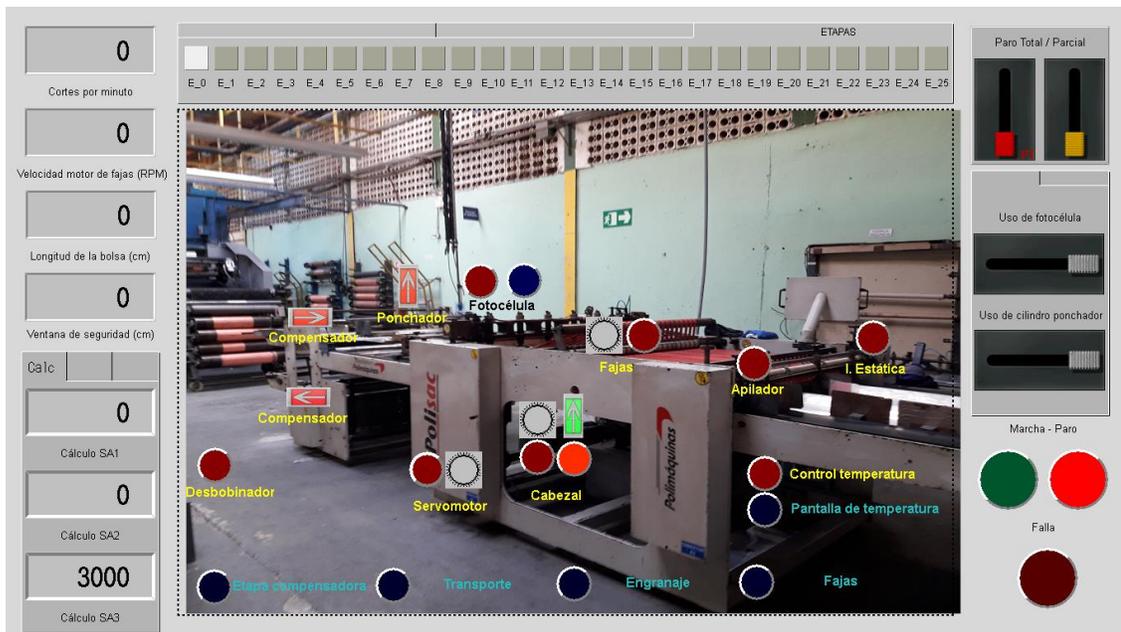


Figura A. 5. Pantalla principal del panel gráfico

**Cortes por minuto:** Cortes por minuto que realiza el cabezal.

**Velocidad motor de fajas (RPM):** Introducir la velocidad deseada para el motor de las fajas en revoluciones por minuto.

**Longitud de la bolsa (cm):** Introducir la longitud de la bolsa en centímetros.

**Ventana de seguridad (cm):**

**Marco 1:** Ubicado en la parte superior de la pantalla.

**Marco 1, Viñeta 1:** Muestra el estado de las salidas del PLC.

**Marco 1, Viñeta 2:** Muestra el estado de las entradas del PLC.

**Marco 1, Viñeta 2:** Indica la etapa actual en que se encuentra el proceso.

**Marco 2:** Ubicado en la parte inferior izquierda de la pantalla.

**Marco 2, Viñeta 1:** Indica el valor en decimal calculado para enviar al módulo de señales analógicas, donde: SA1 corresponde a motor del cabezal, SA2 al motor de fajas y SA3 al servomotor. Rango 0 hasta 6000.

**Marco 2, Viñeta 2:** Indica el valor en decimal enviado al módulo de señales analógicas, donde: SA1 corresponde a motor del cabezal, SA2 al motor de fajas y SA3 al servomotor. Rango 0 hasta 6000.

**Marco 2, Viñeta 3:** Indica el valor actual en los contadores de los decodificadores ópticos.

**Marco 3:** Ubicado en la parte media del lado derecho de la pantalla.

**Marco 3, Viñeta 1:** Interruptor para activación del uso de fotocélula. Tiene efecto solo si máquina se encuentra en paro total. Interruptor para activación del uso del cilindro punchado. Se puede activar en cualquier momento, pero se recomienda hacerlo luego en paro total.

**Marco 3, Viñeta 2:** Movimiento manual de servomotor y motor de cabezal. Al terminar los contadores se establecerán en cero, definiendo de este modo la referencia.

**Interruptor de paro total (PT):** De color rojo, ubicado en la parte superior derecha de la pantalla. Al activar inicia la marcha de la máquina. Al desactivar en cualquier etapa, termina el ciclo actual y detiene la máquina totalmente (posiciona la máquina en la etapa cero).

**Interruptor de paro parcial (PP):** De color naranja, ubicado en la parte superior derecha de la pantalla. Al estar la máquina en marcha, si se activa este interruptor se termina el ciclo actual y se detiene la máquina parcialmente (posiciona la máquina en la etapa 20).

**Luces de marcha, paro y falla:** Luces indicadores del estado de la máquina en la parte inferior derecha de la pantalla.

**Acceso a otras ventanas:** Botones de color azul ubicados en la parte inferior de la pantalla. Con estos se puede acceder a las otras pantallas existentes. Con el botón *Pantalla de temperatura* se accede a la pantalla de la figura 6. Las demás pantallas detallan el estado del proceso en las diferentes partes de la máquina.

**Indicadores en el centro de la pantalla:** Estas luces permiten conocer el estado de los elementos a controlar, haciendo referencia a la ubicación física en la máquina.

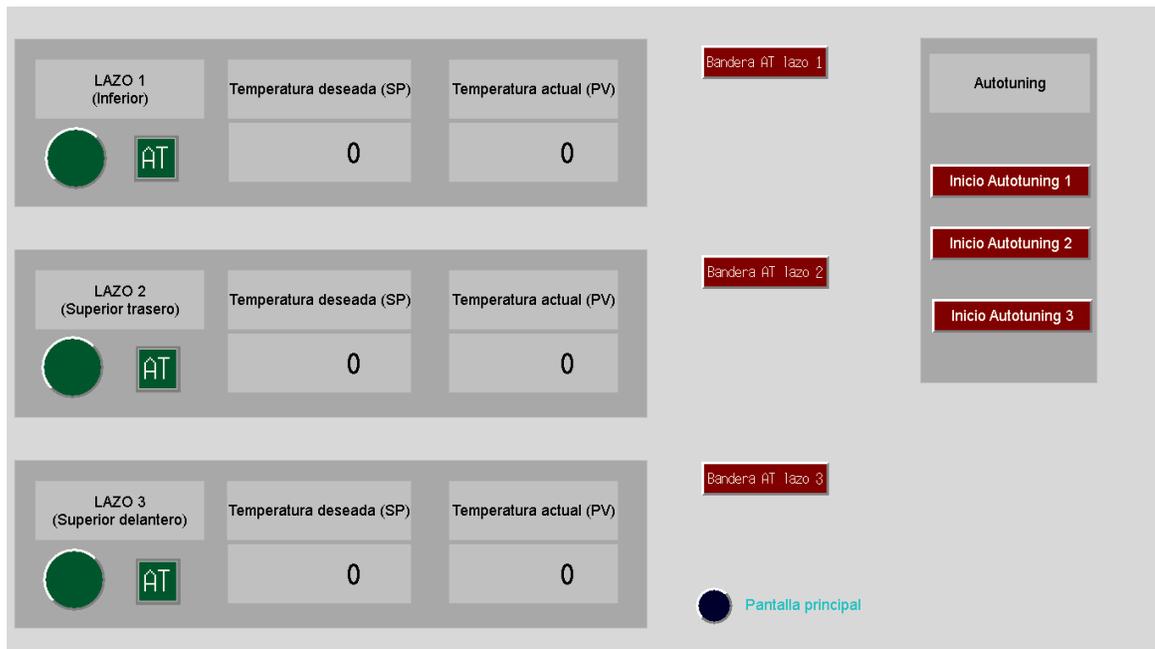


Figura A. 6. Pantalla de configuración de temperatura

En la pantalla de la figura 6 se muestra el estado de cada lazo de control de temperatura.

**Luz verde circular (Lazo 1, 2, 3):** Indicador de que el control de temperatura está activo.

**Luz verde con leyenda AT (Lazo 1, 2, 3):** Indicador de que se está ejecutando el *autotuning* para el lazo correspondiente.

**Temperatura deseada (SP , Lazo 1, 2, 3):** Introducir temperatura deseada para el lazo de control correspondiente.

**Temperatura actual (PV, Lazo 1, 2, 3):** Muestra la temperatura actual del lazo correspondiente.

**Bandera AT (Lazo 1, 2, 3):** Bit que enciende el módulo de control de temperatura. Eliminar en implementación.

**Autotuning:** Sección ubicada a la derecha de la pantalla. Inicia el *autotuning* para el lazo correspondiente al pulsar alguno de los botones.

**Botón Pantalla principal:** Botón de color azul ubicado en la parte inferior. Se utiliza para volver a la pantalla de la figura 5.

#### **A1.4 – Ajustes en la programación**

**Ajustes del ángulo de activación:** Si se considera necesario se puede cambiar el ángulo de activación para cada elemento. Para esto defina el ángulo deseado y utilice la ecuación A.1 para determinar el valor equivalente que se debe programar en la sección correspondiente.

$$Cuentas\ totales_{HSC2} = \frac{\text{Ángulo} \cdot 10000}{360} \quad (A.1)$$

El dato calculado debe programarse como dato de comparación 2 de la instrucción CMPL(060), de acuerdo a la tabla 2.

Tabla A. 2. Instrucciones para ajuste del ángulo de activación

Etapa	Sección	Línea ( <i>Rung</i> )	Detalle
4	E_4	0 (6, 2)	Transición etapa 4 a 5
5	E_5	0 (6, 2)	Transición etapa 5 a 6
6	E_6	0 (6, 2)	Transición etapa 6 a 7
7	E_7	0 (6, 2)	Transición etapa 7 a 8
9	E_9	0 (6, 0)	Transición etapa 9 a 10
10	E_10	1 (6, 0)	Transición etapa 10 a 11
11	E_11	1 (6, 0)	Transición etapa 11 a 12
13	E_13	1 (1, 0)	Límite inferior ventana
13	E_13	1 (2, 0)	Límite superior ventana

## Apéndice B Dirección de entradas y salidas del PLC

Tabla B. 1. Dirección de entradas y salidas del PLC

Nombre	Dirección	Descripción
Entradas		
ED0	0.04	Canal A decod. óptico servomotor
ED1	0.05	Canal B decod. óptico servomotor
ED2	0.01	Canal Z decod. óptico servomotor
ED3	0.06	Canal A decod. óptico cabezal
ED4	0.07	Canal B decod. óptico cabezal
ED5	0.02	Canal Z decod. óptico cabezal
ED6	1.00	Motor de Desbobinador OK
ED7	1.01	Servomotor OK
ED8	1.02	Motor cabezal OK
ED9	1.03	Motor de fajas OK
ED10	1.06	Señal de fotocélula
ED11	1.09	Paro forzado
Salidas		
SD0	100.00	Habilita fotocélula
SD1	100.01	Habilita inhibidor de estática
SD2	100.02	Freno del cabezal
SD3	100.04	Cilindros 1 (comp. inferior)
SD4	100.05	Cilindros 2 (comp. superior)
SD5	100.06	Cilindros 3 (corte)
SD6	100.07	Cilindro 4 (cabezal)
SD7	101.00	Habilita motor desbobinador
SD8	101.01	Habilita servoamplificador
SD9	101.02	Habilita cabezal
SD10	101.03	Habilita fajas
SD11	101.04	Habilita motor apilador

## **Apéndice C   Glosario y abreviaturas**

### **Glosario**

Autotuning: Sintonización automática de las constantes del control PID.

Cabezal: Elemento móvil que gira, cuyo movimiento se produce por la acción del motor principal y realiza el corte y sellado de la bolsa.

Desbobinado: Término con el que se conoce al proceso de desenrollado.

Servoamplificador: Servomecanismo que brinda la potencia necesaria para realizar los movimientos indicados por la señal de control.

Ventana de seguridad: Margen que define punto de detención desde que se recibe señal de fotocélula.

### **Abreviaturas**

PLC: Controlador lógico programable (Programmable Logic Controller).

RPM: Revoluciones por minuto.

VFD: Variador de frecuencia (Variable Frequency Drive).

HSC: Contadores rápidos (High speed counters).

SP: Punto de ajuste (Set point).

PV: Valor del proceso (Process Value)