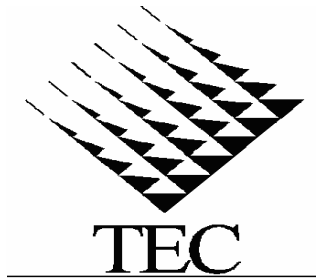


Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**Rediseño del sistema electrónico de control para una máquina insertadora
de bolsas plásticas en cajas de cartón corrugado**

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

Deiby Sandoval Calvo

Cartago, Enero del 2007

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



Ing. Victorino Rojas Madrigal

Profesor asesor



Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 23 de Enero del 2007

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

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

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

Cartago, 25 Enero del 2007



Delby Sandoval Calvo

Céd: 3-390-030

Resumen

El proyecto descrito en este documento fue realizado en la empresa ALCOA CSI de Centroamérica, ubicada en el Parque Industrial de Cartago. El cual, consiste en el rediseño del sistema electrónico de control para una máquina encargada de insertar bolsas plásticas en cajas de cartón corrugado, previamente armadas. Debido a que, desde el primer año de su adquisición presentó problemas de funcionamiento, convirtiéndose en causa de gastos extras para la empresa.

El problema existente se puede definir como el mal funcionamiento de la máquina para inserción de bolsas, cuya importancia de solución recae en la necesidad de eliminar los gastos ocasionados por su frecuente reparación y constante paro. Para solucionar este problema se pretende identificar las principales fallas de control que presenta y las causas de las mismas.

Debido a los enormes gastos que provoca esta máquina en la actualidad, la empresa esta dispuesta a realizar todas las mejoras propuestas por el encargado de este proyecto.

Para el control de todas las etapas del proceso realizadas por esta máquina se pretende utilizar un *Controlador Lógico Programable* (PLC), junto a varios y diversos sensores, para la activación y desactivación pertinente de los motores y las válvulas involucradas en el proceso.

Palabras claves: ALCOA; rediseño; sistema electrónico de control; máquina para insertar bolsas plásticas; Controlador Lógico Programable; PLC, válvulas.

Abstract

The project described in this document was carried out in the business ALCOA CSI of Central America, located in the Industrial Park of Cartago. This consists in redesigning the electronic control system for a machine responsible of inserting plastic bags in cardboard boxes, previously armed. Due to that, since the first year of his acquisition it presented problems of operation, being becoming cause of expenses for the business.

The existing problem can be defined like evil operation of the bag inserter machine, whose importance of solution falls in the need to eliminate the caused expenses by its frequent repair and stopping. To solve this problem intends to identify the main failures of control and the causes.

Due to the enormous expense that causes this machine currently, the business this willing to carry out all the proposed improvements by the responsible for this project.

For the control of all the phases of the process carried out by this machine, it is utilized a Programmable Logic Controller (PLC), next to various and diverse sensors, for the activation and pertinent defusing of the motors and the valves involved.

Keywords: ALCOA; redesigning; electronic control system; machine for inserting plastic bags; Programmable Logic Controller; PLC; valves.

Dedicatoria

A todos los profesores y maestros, que me brindaron su conocimiento para convertirme en un profesional. Que me guiaron durante todo mi proceso de aprendizaje, que culmina en este año una nueva etapa.

Y especialmente, a mi madre y padre por brindarme todo el apoyo necesario durante mi proceso como estudiante. A ellos, que siempre velaron por mi aprendizaje y estuvieron a mi lado. En ocasiones sacrificándose para que pudiera continuar con este duro proceso universitario.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1: Introducción..... | 11 |
| 1.1 Problema existente e importancia de su solución | 11 |
| a. Estancamiento del motor del brazo “inserta bolsa” | 12 |
| b. Debilidad de la estructura total. | 13 |
| c. Errores de control..... | 13 |
| 1.2 Solución seleccionada | 14 |
| Capítulo 2: Meta y objetivos..... | 16 |
| 2.1 Meta | 16 |
| 2.2 Objetivo general | 16 |
| 2.3 Objetivos específicos..... | 16 |
| Capítulo 3: Marco teórico | 17 |
| 3.1 Descripción del proceso a mejorar..... | 17 |
| 3.2 Antecedentes | 18 |
| 3.3 Descripción de los principales principios físicos, de software y electrónicos relacionados con la solución del problema. | 18 |
| Capítulo 4: Procedimiento metodológico | 27 |
| 4.1 Reconocimiento y definición del problema..... | 27 |
| 4.2 Obtención y análisis de información | 27 |
| 4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución | 28 |
| 4.4 Implementación de la solución | 28 |
| 4.5 Reevaluación y rediseño..... | 29 |
| Capítulo 5: Descripción detallada de la solución..... | 30 |
| 5.1 Análisis de las soluciones y selección final | 30 |
| a. Estancamiento del motor del brazo inserta bolsa. | 30 |
| b. Debilidad de la estructura total. | 32 |
| c. Errores de control..... | 33 |
| 5.2 Descripción del hardware..... | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3 Descripción del software | 37 |
| a. Modo automático | 40 |
| b. Modo manual | 42 |
| c. Modo de traslado de cajas | 43 |
| Capítulo 6: Análisis de resultados..... | 45 |
| 6.1 Resultados | 45 |
| 6.2 Análisis..... | 51 |
| Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones..... | 56 |
| 7.1 Conclusiones | 56 |
| 7.2 Recomendaciones | 57 |
| Bibliografía | 58 |
| Apéndices..... | 59 |
| A.1 Glosario, abreviaturas y simbología | 59 |
| A.2 Información sobre la empresa..... | 60 |
| A.2.1 Descripción de la empresa..... | 60 |
| A.2.2 Descripción del departamento en la que se realiza el proyecto..... | 60 |
| A.2.3 Antecedentes prácticos..... | 61 |
| A.3 Tablas representativas de los gastos provocados por la máquina..... | 62 |
| A.4 Análisis matemático del sistema neumático..... | 63 |
| Anexos..... | 65 |
| Anexo 1. Fotografías de la máquina insertadora de bolsas | 65 |
| Anexo 2. Diagrama de entradas del PLC..... | 67 |
| Anexo 4. Descripción de las estradas y las salidas del PLC..... | 69 |
| Anexo 5. Reporte de fallas en la máquina insertadora de bolsas referente al mes de noviembre del 2006. | 72 |
| Anexo 6. Bosquejos de la máquina insertadora de bolsas. | 73 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 1.1 | Bosquejo lateral de la máquina insertadora de bolsas plásticas en cajas de cartón..... | 11 |
| Figura 1.2 | Diagrama de estados del proceso de inserción de bolsas plásticas en cajas de cartón..... | 15 |
| Figura 3.1 | Diagrama de flujo del proceso realizado por la máquina insertadora de bolsas. | 17 |
| Figura 3.2 | Variador de velocidad de CA PowerFlex 4..... | 19 |
| Figura 3.3 | Sistema rotacional-traslacional. | 21 |
| Figura 3.4 | Símbolo de las electroválvulas utilizadas para el sistema neumático. | 24 |
| Figura 3.5 | Activación y desactivación de una válvula solenoide 3/2..... | 24 |
| Figura 3.6 | Bosquejo del sistema de actuación neumático para una de las guías. | 25 |
| Figura 5.1 | Diagrama de bloques del sistema de control electrónico implementado. | 35 |
| Figura 5.2 | Diagrama de estados del proceso de inserción de bolsas plásticas en cajas de cartón..... | 38 |
| Figura 6.1 | Tiempo efectivo de funcionamiento en primera etapa de prueba de cuatro días. | 45 |
| Figura 6.2 | Tiempo efectivo de funcionamiento en segunda etapa de prueba de cuatro días. | 45 |
| Figura 6.3 | Porcentaje de tiempo de cada etapa del proceso de inserción de bolsas. | 47 |
| Figura 6.4 | Fallas de funcionamiento por mes, de la máquina insertadora de bolsas. | 47 |
| Figura 6.5 | Diagrama de conexión para la medición del tiempo de retardo de un sistema neumático. | 48 |
| Figura 6.6 | Comparación entre la salida hacia el brazo abre bolsa y el sensor que marca su posición inicial (abre bolsa atrás). | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.7 Diagrama de conexión para la medición del tiempo de retardo de un sistema mecánico. | 49 |
| Figura 6.8 Comparación entre la salida hacia el brazo inserta bolsa y el sensor que marca su posición inicial (inserta bolsa arriba). | 49 |
| Figura 6.9 Comparación entre la salida hacia el brazo abre bolsa y el sensor que marca cuando el brazo recoge bolsa esta abajo (recoge bolsa abajo). | 50 |
| Figura 6.10 Comparación entre la salida hacia el brazo inserta bolsa y el sensor que marca la posición inicial del brazo abre bolsa (abre bolsa atrás). | 50 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Tabla 3.1 | Instrucciones típicas de un PLC. | 23 |
| Tabla 3.2 | Bloque funcional neumático..... | 25 |
| Tabla 5.1 | Entradas y salidas del PLC..... | 39 |
| Tabla 5.2 | Entradas de sensores activas y desactivas necesarias para que se de cada estado del proceso de inserción de bolsas. | 40 |
| Tabla 5.3 | Salidas activas y desactivas en cada estado del proceso de inserción de bolsas. | 41 |
| Tabla 6.1 | Simulación de condiciones de error y respuesta obtenida..... | 46 |

Capítulo 1: Introducción

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Para almacenar y trasladar las tapa-rosclas producidas por la empresa ALCOA CSI de Centroamérica¹, se utilizan cajas de cartón corrugado con bolsas plásticas en su interior. Para esto se cuenta con dos máquinas que funcionan en cadena. La primera es una armadora de cajas de cartón corrugado. Seguida de ésta se encuentra la encargada de insertar las bolsas plásticas dentro de la caja. En la Figura 1.1 se puede observar un bosquejo lateral de la máquina insertadora de bolsas².

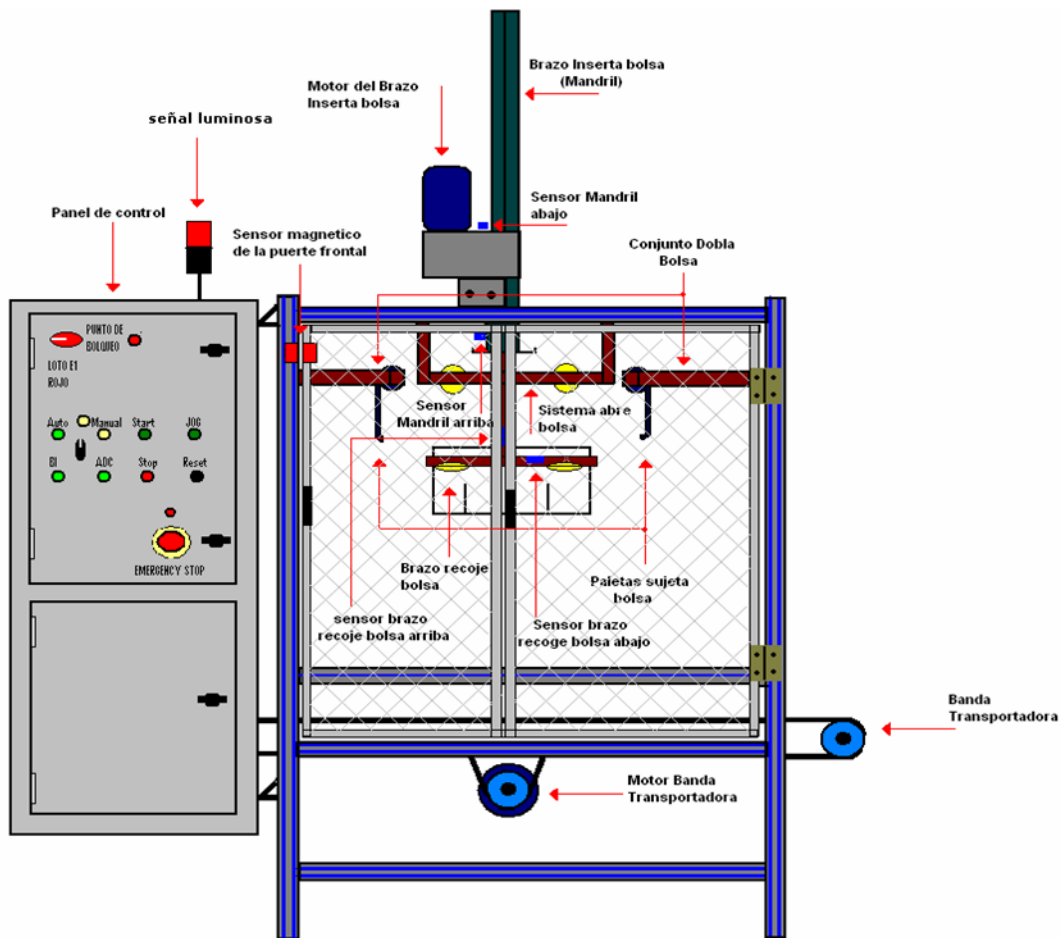


Figura 1.1 Bosquejo lateral de la máquina insertadora de bolsas plásticas en cajas de cartón.

¹ Ver documento [3] citado en la bibliografía y apéndice A.2

² En el anexo 6 se encuentran bosquejos de la máquina vista desde otros puntos.

El problema existente es que la máquina insertadora de bolsas³ no esta cumpliendo con los requerimientos de la empresa, debido a su continua falla y por ende, la necesidad de una nueva reparación. La importancia de la solución se puede enfocar desde el punto de vista económico. Ya que, esta máquina esta provocando enormes costos a la empresa (ver apéndice A.3).

Debido a que el proyecto es el rediseño de un sistema de control, se identificaron los problemas que presentaba el sistema, con el fin de solucionar cada uno de ellos por separado. A continuación se hará una pequeña definición de cada uno de ellos.

a. Estancamiento del motor del brazo “inserta bolsa”.

Razones:

Movimiento oscilatorio excesivo del brazo inserta bolsa

Se debe al largo del brazo, el cual es de aproximadamente 1.5 m, y a la falta de sustentación del mismo. Ya que, el único punto de apoyo se encuentra en el eje que lo hace moverse hacia arriba o hacia abajo, provocando que cuando se activa el movimiento empieza a oscilar.

Vibración excesiva de la base del motor

Se debe a la debilidad de la base que lo soporta, y de la estructura física en general. Provocando que, cuando el motor arranca, se genere una vibración sobre el *brazo inserta bolsa* y la estructura que lo soporta.

Continuo trabado del motor del brazo inserta bolsa

Cuando se desactiva la señal de *Fordware* (hacia abajo) o *Reverse* (hacia arriba) el motor se detiene por inercia. Pero en ocasiones, el programa de control no las desactiva provocando que el *mandril* sobrepase los límites de posición preestablecidos.

³ En el anexo 1 se pueden observar fotografías de esta máquina.

b. Debilidad de la estructura total.

Aunque este problema es mecánico puede afectar el desarrollo de la solución. Ya que, una falla de la estructura física o neumática repercute en la eficiencia del proceso. Esta debilidad puede provocar:

- ❖ Desconexiones eléctricas.
- ❖ Daños a los sensores.
- ❖ Detención o errores del proceso de insertado de bolsas.

c. Errores de control.

Variables o condiciones de error no consideradas.

En modo automático

- ❖ No detecta cuando se produce un error en la secuencia del proceso.
- ❖ No detiene los motores cuando existe un problema en la secuencia.
- ❖ La detención del motor del brazo inserta bolsa depende de otros sensores, además de los propios.
- ❖ La señal de alarma esta inhabilitada (condición de encendido nunca se genera).
- ❖ No detiene al brazo inserta bolsa en su posición superior o inferior, cuando se presiona el botón de Stop o se abre la puerta delantera.

En modo manual

- ❖ El movimiento del *brazo inserta bolsa (Mandril)* no depende de los sensores.
- ❖ No se encuentra activada la acción de movimiento del *Mandril*.

Señales inutilizadas.

La causa es la constante reparación y cambios de la máquina insertadora de bolsas, por parte del proveedor.

1.2 Solución seleccionada

A continuación se enlistan ciertos requerimientos pedidos por la empresa:

- Desarrollar un sistema de control electrónico que ayude a convertir la máquina actual en una máquina industrial eficiente.
- Utilizar un PLC como unidad de control.
- Incluir, en el desarrollo de control, la opción de seleccionar entre modo automático, modo manual o neutral.
- Aumentar el rendimiento (velocidad del proceso) y la eficiencia (cantidad de tiempo ininterrumpido de funcionamiento).
- Implementar un sistema de control que requiera de la mínima intervención humana.

Considerando los requerimientos anteriores, se buscó la mejor solución. La cual, se basa en la utilización de un Controlador Lógico Programable (PLC) como base para el sistema de control.

El PLC tendrá como función determinar la secuencia de operación a seguir, con base a las señales de los sensores y las del panel de control. No obstante, el principal objetivo es la automatización del proceso de inserción de bolsas plásticas en las cajas de cartón corrugado, con el fin de disminuir la intervención humana.

Para cumplir con este primer objetivo se definieron y plantearon una serie de pasos a seguir para realizar un ciclo completo de inserción de la bolsa. Convirtiendo al proceso en un desarrollo secuencial, explicado con la Figura 1.2 (siguiente página). Se desarrolló el programa para PLC que realizara tal función, el cual se describe con mayor detalle en el Capítulo 5. Hasta lograr la realización del proceso en forma automática.

Se empezó a desarrollar una subrutina encargada de la inserción de bolsas en modo manual. En este modo la secuencia de pasos será completamente gobernada por el usuario desde el panel de operación. La necesidad de este modo se enfoca en la revisión y mantenimiento, necesario para la máquina.

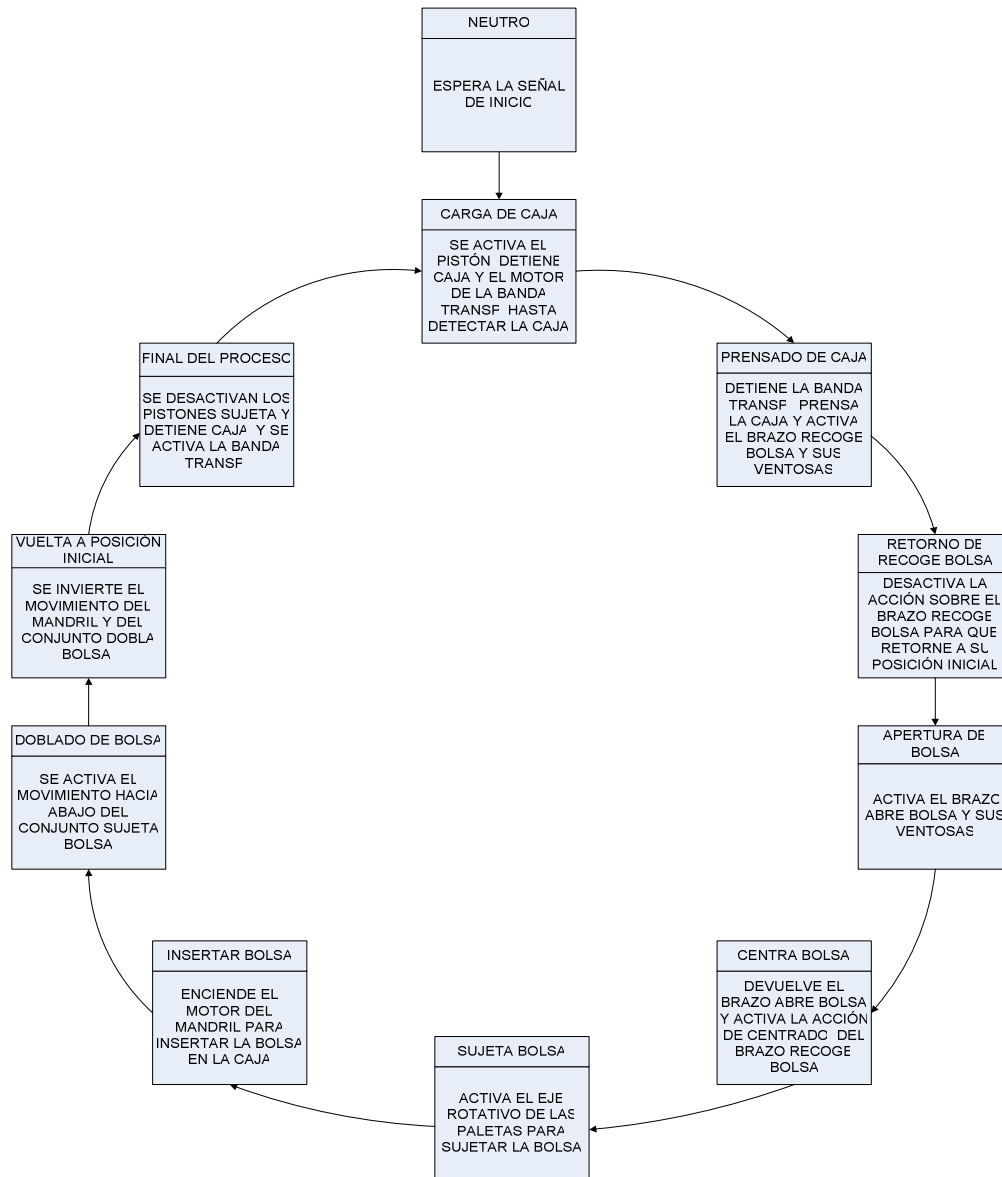


Figura 1.2 Diagrama de estados del proceso de inserción de bolsas plásticas en cajas de cartón.

Capítulo 2: Meta y objetivos.

2.1 Meta

Aumentar el rendimiento y la eficiencia de la máquina insertadora de bolsas.

2.2 Objetivo general

Implementar un sistema electrónico para el control de la máquina insertadora de bolsas.

2.3 Objetivos específicos

- Implementar un sistema electrónico de control para el proceso de inserción de bolsas, basado en un PLC⁴, para aumentar el rendimiento del proceso de inserción de bolsas.
- Desarrollar un programa para el PLC capaz de controlar el proceso de inserción de bolsas, para aumentar la eficiencia del proceso de inserción de bolsas
- Generar un manual de usuario para la empresa, para el mantenimiento preventivo, arranque y reparación de la máquina.

⁴ Ver documento [1] citado en la bibliografía y apéndice A.1.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Descripción del proceso a mejorar.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, el proceso a mejorar es el encargado de insertar bolsas plásticas en las cajas de cartón, previamente armadas. A continuación se muestra una descripción del proceso realizado por esa máquina cuando se encuentra en modo automático.

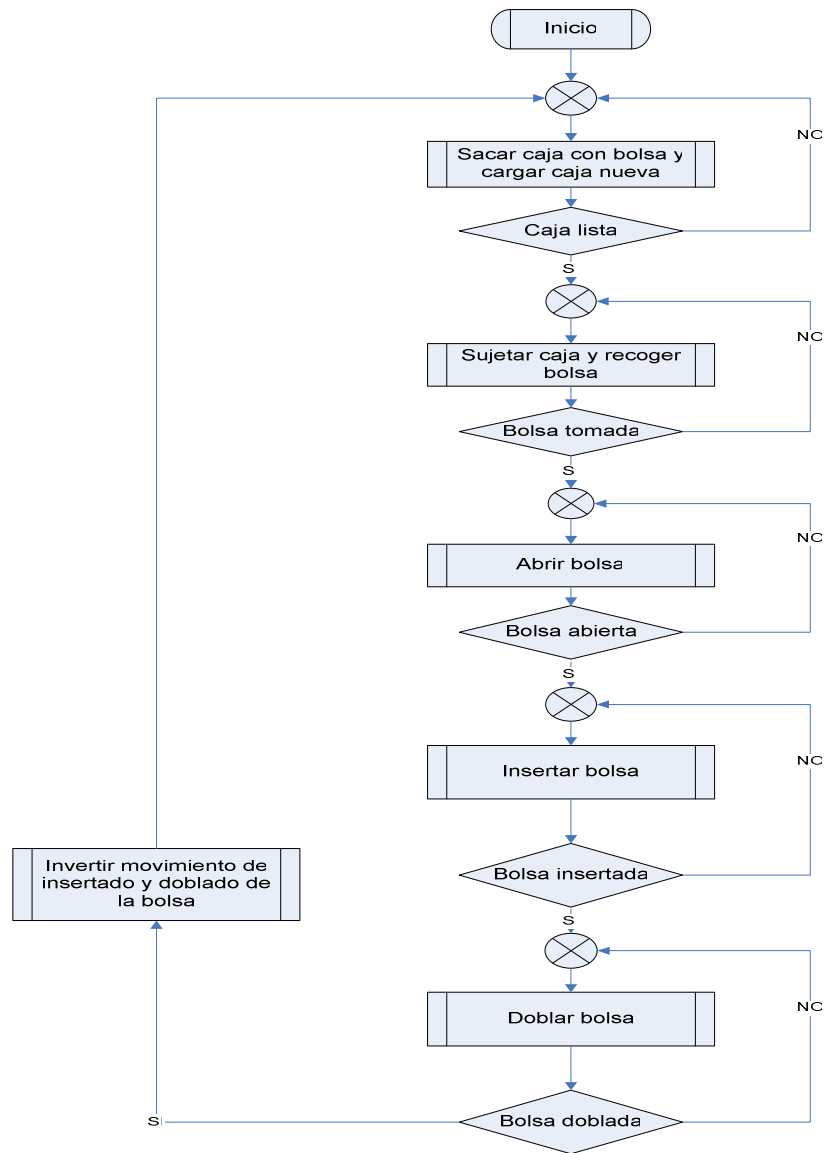


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso realizado por la máquina insertadora de bolsas.

La Figura 3.1 describe a gran escala el proceso de inserción de bolsas. Los cambios realizados se enfocaron en la optimización del proceso, con el fin de mejorar el rendimiento y la eficiencia.

3.2 Antecedentes

La empresa cuenta con reportes, en los cuales se describen las fallas en funcionamiento y las medidas que se tomaron para solucionarlas. Todo esto, antes de que el estudiante empezara con el presente proyecto. Estos reportes servirán para comparar la continuidad de trabajo antes y después de la intervención del estudiante. En el anexo 5 se puede observar la hoja de reportes referente al mes de noviembre del 2006.

Las pérdidas provocadas por la máquina, se obtuvieron mediante un estudio realizado por el señor Fernando Sánchez, quién a su vez facilito el documento para la realización del anteproyecto. Éste informe no se adjunta al anteproyecto por razones de confidencialidad. En el anexo 1 se encuentran fotos de la máquina insertadora de bolsas al momento de llegar a la empresa.

3.3 Descripción de los principales principios físicos, de software y electrónicos relacionados con la solución del problema.

El movimiento de la banda transportadora como el del *Mandril*, de la máquina insertadora de bolsas, es generado por motores de inducción trifásicos.

Un motor trifásico se podría definir como:

“Una máquina que tenga solamente el devanado amortiguador se denomina *máquina de inducción*, y se llama así porque el voltaje del rotor (que a su vez produce la corriente y el campo magnético del rotor) es *inducido* en el devanado del rotor sin que existan conexiones físicas por medio de conductores. Un motor de inducción se distingue porque *no necesita de corriente de excitación de cc para funcionar.*”⁵

⁵ Ver página 481 del documento [5] citado en la bibliografía.

“Hay dos tipos diferentes de rotores para motores de inducción. Uno se conoce como *rotor de jaula de ardilla* o simplemente *rotor de ardilla* y el otro como *rotor devanado*.

...Un rotor jaula de ardilla de un motor de inducción consiste en una serie de barras conductoras colocadas dentro de unas ranuras hechas en la superficie del rotor con sus extremos puestos en cortocircuito por medio de *anillos*...

El otro tipo de rotor es el denominado rotor devanado, que tiene un arrollamiento trifásico completo que es una imagen reflejada del devanado del estator. Las tres fases del arrollamiento de este rotor, usualmente se conectan en Y sus extremos se conectan a unos anillos rozantes montados en el eje.”⁶

A su vez, cada uno es controlado mediante un variador de velocidad de CA *PowerFlex 4*. En la siguiente figura se puede observar el aspecto físico del mismo.



Figura 3.2 Variador de velocidad de CA PowerFlex 4.⁷

Este dispositivo, presenta diversas funciones para el control de motores trifásicos. Para este proyecto, las principales funciones utilizadas son:

- Arranque suave de un motor trifásico.
- Cambio en el sentido de giro del motor.
- Frenado por inercia o por corriente directa (CD) de un motor trifásico.
- Control por entradas CD (*Stop, Forward, Reverse*) o manual (desde el teclado).
- Control de velocidad.

⁶ Ver páginas 481 a 483 del documento [5] citado en la bibliografía.

⁷ Figura tomada de la hoja de datos del variador de velocidad *PowerFlex4*

La función del motor de la banda transportadora es la de sacar la caja lista y colocar en posición una nueva caja para iniciar el proceso de inserción de la bolsa. Por tal razón, para el control de este motor solo se necesita una señal del PLC hacia el variador (*Forward*), ya que debe arrancar y girar siempre en una misma dirección. Además, el paro por inercia es suficiente para este caso, ya que la caja nueva es detenida por un pistón neumático, que sirve como final de carrera.

Por su parte, el motor del *Mandril*, utilizado para la inserción de la bolsa en la caja de cartón, necesita de dos señales de control hacia el variador. Lo anterior, debido a que este motor debe realizar un cambio de giro que permita, mover el mandril hacia abajo para insertar la bolsa y luego devolverlo a su posición inicial. No obstante, queda abierta la posibilidad de realizar un paro por nivel de CD, si se considera que el paro por inercia es ineficiente.

“Un buen método para hacer que un motor de inducción se pare rápidamente es con el frenado de corriente directa. Si se excita el estator de un motor de inducción por corriente directa, se establece un flujo de cd en el motor,... En los conductores del rotor se generan voltajes que hacen que fluya corriente en la jaula de ardilla (o en el secundario de circuito cerrado del rotor devanado). Esta corriente, en combinación con el flujo de cd, desarrolla torsión opuesta a la mueve al motor....”⁸

El sistema de insertado de bolsas esta compuesto por un brazo de aproximadamente 1.5m y un motor que genera su movimiento. A continuación se muestran las principales ecuaciones que describen a un sistema rotacional-traslacional, basado en la siguiente figura.

⁸ Ver sección 25-2 del documento [6] citado en la bibliografía

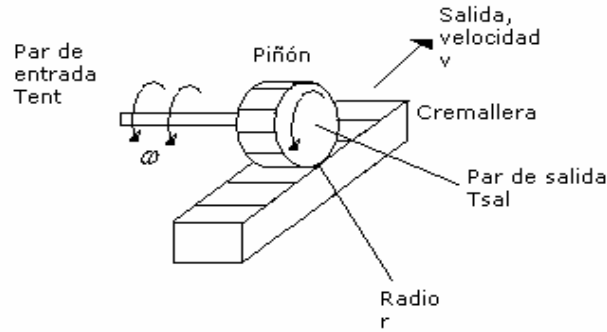


Figura 3.3 Sistema rotacional-traslacional.⁹

La ecuación que describe aceleración de salida del conjunto traslacional se encuentra a continuación:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \left(\frac{r}{I + mr^2} \right) (T_{ent} - rcv) \quad (3.1)$$

Donde:

I = momento de inercia del piñón.

cv = la fuerza de fricción.

El análisis de cómo se llegó a la ecuación 3.1, se puede encontrar en la página 213 del documento [7] citado en la bibliografía.

En cuanto a la unidad de control, se utilizó un PLC *Micrologix 1200*, de la marca Allen-Bradley. Este dispositivo se encarga de generar las acciones necesarias, con base a las condiciones de los sensores de entrada. Para tal objetivo, cuenta con 24 entradas y 16 salidas (tipo relevador).

Las partes típicas que componen un PLC, son la *unidad central de procesamiento* (CPU por sus siglas en inglés, *central processing unit*), la sección de *entradas/salidas* (I/O por sus siglas en inglés, *input/output*), la *fuentes de alimentación* y el *dispositivo de programación*.

⁹ Basada en la Figura 9.4, pag 213, del documento [7] citado en la bibliografía.

A continuación se describen cada uno por separado:¹⁰

El *CPU* se puede definir como el “cerebro” del PLC, el cual consiste, comúnmente, en un microprocesador para la implementación de la lógica programada y un controlador de la comunicación con los demás módulos. Además, se necesita una memoria para almacenar los resultados temporales de la lógica de operación, junto al programa ingresado. Esta memoria puede ser EPROM o EEPROM, más una RAM.

La *sección de I/O* está compuesto por el módulo de entradas y el módulo de salidas. Estos son utilizados para conectarse con los dispositivos externos, y tomar las condiciones recibidas o enviar señales de control. Además de las entradas y salidas que presenta el PLC, la sección I/O puede ser extendida mediante módulos externos de entrada o de salida acoplables al mismo.

La *fuerza de alimentación* provee la tensión CD necesaria para todos los módulos internos y dispositivos externos del PLC. No obstante, para una carga muy grande; es recomendable la utilización de fuentes externas de poder.

El *dispositivo o conector de programación*, es usada para ingresar el programa en la memoria del procesador. El cual determinara la secuencia de operación y finalmente el control de los dispositivos externos.

El estudio, por parte del estudiante, del lenguaje de programación para el PLC utilizado, abarca desde los principios básicos de funcionamiento, hasta el manejo de instrucciones avanzadas para la optimización del proceso. La mayor parte de esta retroalimentación se baso en el documento [4] citado en la bibliografía. En la tabla 3.1 se enlistan las instrucciones típicas par un PLC.

¹⁰ La descripción es basada en el documento [4] citado en la bibliografía, páginas 5 a la 8.

Tabla 3.1 Instrucciones típicas de un PLC.¹¹

| Instrucción | Operación |
|-------------|---|
| XIC | Examina la condición de encendido de un bit |
| XIO | Examina la condición de apagado de un bit |
| OTE | Encendido de un bit, pero no se retiene si las condiciones de encendido desaparecen. |
| OTL | Encendido de un bit y lo retiene de ese modo, a pesar de que las condiciones de encendido se quiten. |
| OTU | Apagado de un bit y lo retiene de ese modo, a pesar de que las condiciones de apagado se quiten. |
| TOF | Enciende o apaga una salida, cuando se cumple el intervalo de tiempo predefinido y la salida de este se apaga. |
| TON | Enciende o apaga una salida, cuando se cumple el intervalo de tiempo predefinido y la salida de este se enciende. |
| CTD | Contador por software que decrementa desde un valor específico y apaga su salida |
| CTU | Contador por software que incrementa hasta un valor específico y enciende su salida. |

Sumado a la etapa de control (PLC) y la mecánica (motores), se encuentra el sistema neumático. Compuesto por un conjunto de válvulas y una bomba de presión. Este sistema es el encargado de activar y desactivar:

- ❖ Al brazo *recoge bolsa*.
- ❖ Las ventosas *recoge bolsa*.
- ❖ Al brazo *abre bolsa*.
- ❖ Las ventosas *abre bolsa*.
- ❖ Al brazo *centra bolsa*.
- ❖ Las paletas *sujeta bolsa*.
- ❖ Al pistón *sujeta caja*.
- ❖ Los pistones *detiene caja*

¹¹ Pagina 15 del documento [4] citado en la bibliografía.

Las válvulas utilizadas son electroválvulas 3/2 de carrete accionadas por solenoide, cuyo símbolo se muestra en la Figura 3.4

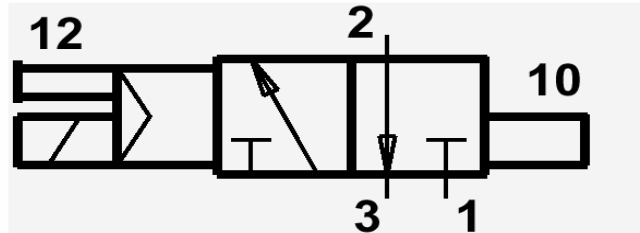


Figura 3.4 Símbolo de las electroválvulas utilizadas para el sistema neumático.¹²

El análisis del funcionamiento del sistema neumático fue basado en el capítulo 5 del documento [7] citado en la bibliografía. A continuación se describe el funcionamiento de las electroválvulas.

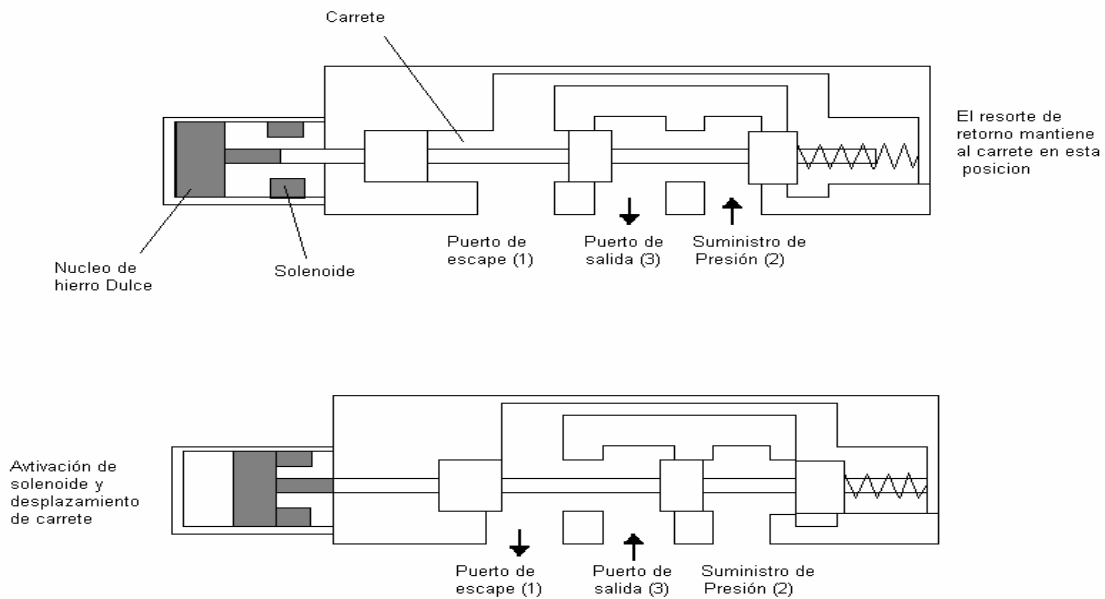


Figura 3.5 Activación y desactivación de una válvula solenoide 3/2.¹³

¹² Figura tomada de la hoja de datos de la válvula.

¹³ Figura basa en la Figura 5.9 (pag. 126) del documento [7] citado en la bibliografía.

Todos los sistemas neumáticos presentan la misma conexión, por lo que a continuación se modela solo una de las guías. Se toma la siguiente figura como base.

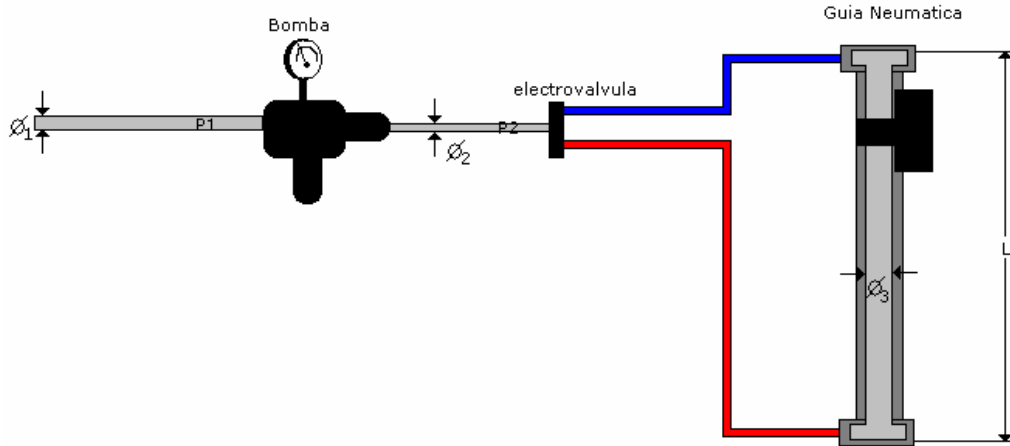


Figura 3.6 Bosquejo del sistema de actuación neumático para una de las guías.

Además de las ecuaciones que describen la inercia, capacitancia y resistencia de un bloque neumático. Mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Bloque funcional neumático.¹⁴

| Variable | Ecuación que lo describe | Energía almacenada o potencia disipada |
|--------------|---|---|
| Inercia | $\dot{m} = \frac{1}{L} \int (p_1 - p_2) dt$ | $E = \frac{1}{2} I \frac{\partial^2 m}{\partial t^2}$ |
| Capacitancia | $\dot{m} = C \frac{\partial (p_1 - p_2)}{\partial t}$ | $E = \frac{1}{2} C (p_1 - p_2)^2$ |
| Resistencia | $\dot{m} = \frac{p_1 - p_2}{R}$ | $P = \frac{1}{R} (p_1 - p_2)^2$ |

Donde:

L = largo de la guía

C = capacitancia neumática

R = resistencia neumática

$$\dot{m} = \frac{\partial m}{\partial t}$$

p = presión del gas

¹⁴ Basada en la tabla 8.3, pag. 201, del documento [7] citado en la bibliografía.

El hecho de que se hable de la masa como una variable en el tiempo, es debido a que el gas es compresible. Es decir, el cambio de presión afecta el volumen y la densidad.

Del análisis matemático de este sistema (apéndice A.4) se tienen las siguientes ecuaciones que la describen. Para el caso de la bomba se obtiene que:

$$p_1 - p_2 = R \dot{m} \quad (3.2)$$

La ecuación que describe como la presión entre la bomba y la electroválvula varía con el tiempo, se muestra a continuación

$$p_1 = R(C_1 + C_2) \frac{\partial p_2}{dt} + p_2 \quad (3.3)$$

A continuación se muestra la ecuación que representa el tiempo que tarda el pistón en ir de un lado a otro de la guía neumática.

$$t = \sqrt{\dot{m}^* \frac{2L}{p_2 A}} \quad (3.4)$$

Sabiendo que el área y la longitud de la guía neumática son constantes. Y considerando la variación de la masa despreciable. Se puede concluir como el tiempo de la actuación del pistón es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión de entrada.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

4.1 Reconocimiento y definición del problema

En una reunión que se sostuvo con el Superintendente de Producción de ALCOA, el señor Fernando Sánchez, se definió el problema como el mal funcionamiento de la máquina insertadora de bolsas, lo cual provoca pérdidas para la empresa en cuanto a mantenimiento y gastos en repuestos.

Luego de definir el problema, el señor Sánchez, describió los principales inconvenientes que presenta la máquina y el deseo de la empresa por corregirlos. No obstante, la identificación del problema, en cuanto al mal funcionamiento, se realizará mediante pruebas de campo.

4.2 Obtención y análisis de información

La información, en cuanto al funcionamiento de la máquina insertadora de bolsas y las pérdidas provocadas por ésta, fue dada en su totalidad por la empresa, mediante manuales de funcionamiento, informes de gastos y reuniones con el encargado de producción.

El análisis de la información inicio con el estudio del funcionamiento actual de la máquina insertadora de bolsas, con el fin de determinar las diferentes etapas que conlleva el proceso de inserción de bolsas. Definidas estas etapas se pretende realizar pruebas de campo, para comprobación.

En cuanto al análisis de las pérdidas provocadas por la máquina, se tomaron los gastos en repuestos y mantenimiento, junto a las pérdidas provocadas por daños a las bolsas. Todos estos sumados, determinan las pérdidas y gastos anuales que presenta la máquina actualmente.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Para determinar las alternativas de solución se pretende definir y analizar las principales causas de los inconvenientes en el proceso de inserción de bolsas. Siendo necesario la realización de pruebas de campo.

La definición de la solución propuesta en este anteproyecto, considera lo deseado por la empresa. Junto a los problemas descritos en las reuniones y el deseo por un rediseño parcial de la máquina insertadora de bolsas.

Se pretende realizar un rediseño del control del proceso, en el cual se corrijan los problemas encontrados con las pruebas. Además, se analizará la posibilidad de incorporar nuevos sensores que ayuden a una mejor exactitud del proceso, con el fin de disminuir los daños en las bolsas o en las cajas de cartón corrugado.

Para la síntesis final de la solución se tomarán todas las mejoras de diseño definidas para cada etapa del proceso, conjugándolas en una solución final. La cual será presentada a la empresa para su aprobación y su seguida implementación. Es necesario, especificar que la empresa desea incorporar inmediatamente, a la línea de producción, la máquina insertadora de bolsas al final del proyecto.

4.4 Implementación de la solución

La empresa desea que la solución final de control sea implementada mediante un PLC. Las pruebas de funcionamiento se realizarán mediante simulaciones en computadora. Realizadas y aprobadas las simulaciones, se pretende implementar el programa en el PLC de la máquina insertadora de bolsas (el cual puede ser cambiado si se considera necesario) para realizar pruebas de campo. Cada prueba debe ser aprobada por el encargado en la empresa.

Para determinar el cumplimiento de los objetivos planteados, primero se expondrá la máquina a pruebas en las cuales se simulen las principales causas de error existentes actualmente y definidas durante la sección de pruebas iniciales. Finalmente, se ingresará la máquina a la línea de producción para analizar su rendimiento en situaciones reales.

4.5 Reevaluación y rediseño

Para las posibles mejoras futuras al proceso de inserción de bolsas, es necesario un estudio y análisis del funcionamiento que presente la máquina al final del proyecto. Identificando posibles problemas, con el fin de determinar y corregir las causas de los mismos. Además, será necesario estudiar el documento que describa cada una de las etapas involucradas en el nuevo proceso, el cual será entregado por el encargado de este proyecto al final del mismo.

Las pruebas de campo y la simulación de errores, son las mejores formas de definir un posible rediseño. Para lo cual, es necesaria una reevaluación de los objetivos deseados y los alcanzados.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución.

5.1 Análisis de las soluciones y selección final

Como se explicó en la definición del problema, este proyecto se puede dividir en secciones individuales, dándose la posibilidad de plantear soluciones independientes para cada uno de ellos, que sumadas generaron la solución final. A continuación se describen las soluciones propuestas para cada uno de los subproblemas planteados en el Capítulo 1.

a. Estancamiento del motor del brazo inserta bolsa.

Movimiento oscilatorio excesivo del brazo inserta bolsa.

Solución propuesta:

- Hacer del *brazo inserta bolsa* un sistema auto guiado.

Ventajas:

- ✓ Se evita el movimiento oscilatorio causado por el largo del brazo.
- ✓ Se mantiene el mismo sistema para la inserción de la bolsa.

Desventajas:

- ✓ Se necesita una modificación física-mecánica.

Vibración excesiva de la base del motor

Solución propuesta:

- Reforzar la base de sustentación del motor.

Ventajas:

- ✓ Ayuda a evitar el movimiento oscilatorio del *brazo inserta bolsa*.
- ✓ Se mantiene el mismo sistema para la inserción de la bolsa.

Desventajas:

- ✓ Se necesita una modificación física para reforzar la estructura.

Continuo trabado del motor del brazo inserta bolsa.

Soluciones propuestas:

➤ Implementación del freno para el motor.

Ventajas:

- ✓ Se necesita solamente una señal mas de control por parte del PLC.
- ✓ El control del freno es realizado por software.
- ✓ El controlador del motor, cuenta con la función de frenado.
- ✓ No se debe invertir en la compra de otro tipo de motor.

Desventajas:

- ✓ El control del motor sigue siendo controlado por los sensores.
 - ✓ Se debe realizar una modificación al cableado del sistema de control.
- Cambio del motor de inducción por un servo motor.

Ventajas:

- ✓ El control de posición del brazo inserta bolsa no dependerá de los sensores.
- ✓ El movimiento del brazo inserta bolsa será mas exacto.

Desventajas:

- ✓ Los sensores siguen siendo necesarios para el control del proceso.
 - ✓ Se debe realizar una inversión para la compra del servo motor y su correspondiente controlador.
- Control del motor independiente del proceso

Ventajas:

- ✓ El control de posición del brazo inserta bolsa solo dependerá de los sensores correspondientes y no de todas las entradas.
- ✓ No es necesaria ninguna salida más del PLC.
- ✓ Los cambios necesarios son a nivel de software.

Desventajas:

- ✓ El control de posición del motor sigue siendo controlado por los sensores.

Las soluciones para evitar la vibración y oscilación del conjunto inserta bolsa fueron dadas por personal de la empresa en combinación con el estudiante a cargo de este proyecto, debido a que son más del área de mecánica.

Para el caso de la tercera condición de estancamiento del motor, la solución seleccionada es el control independiente del motor, debido a la facilidad de desarrollo, sin la necesidad de una nueva inversión. Por otra parte, no es necesario tener un control muy preciso de la posición del *Mandril*, lo cual respalda a la solución escogida.

b. Debilidad de la estructura total.

Solución propuesta:

- Reforzado de la estructura física.

Ventajas:

- ✓ Se evita el movimiento excesivo de la estructura.
- ✓ Se mantiene la misma secuencia para la inserción de bolsas.
- ✓ Se convierte a la insertadora de bolsas en una máquina industrial.

Desventajas:

- ✓ Se necesita de una nueva inversión.
- ✓ Se debe volver a instalar todo el sistema neumático, eléctrico y electrónico.

La solución propuesta para este problema, también, fue tomada en conjunto con personal capacitado de la empresa. Debido a la necesidad de conocimiento mecánico. Por esta misma razón, no se entra en detalle de cada una de las modificaciones físicas que se le realizaran a la máquina.

c. Errores de control.

Variables o condiciones de error no considerados.

Soluciones propuestas:

➤ Modificación del software de control en el PLC.

Ventajas:

- ✓ No es necesario modificaciones físicas.
- ✓ Ya se tienen presentes muchas de estas condiciones de error.
- ✓ La reprogramación del PLC es sencilla

Desventajas:

- ✓ Se necesita detener el proceso para pruebas de campo.
- ✓ Se debe invertir tiempo para estudiar y entender el programa actual.

➤ Reprogramación del software de control.

Ventajas:

- ✓ No es necesario modificaciones físicas.
- ✓ Se pueden considerar todas las condiciones de error.
- ✓ Explora el conocimiento del estudiante.
- ✓ Se pueden realizar los cambios necesarios para aumentar la eficiencia del programa.

Desventajas:

- ✓ Se necesita detener el proceso para pruebas de campo.

La segunda opción es la escogida para solucionar este problema, debido a que requiere de una mayor intervención por parte del estudiante, ayudando a cumplir con los requisitos del proyecto. Además, presenta todas las ventajas de la primera.

Señales inutilizadas

Soluciones propuesta:

➤ Identificación y eliminación de las señales inutilizadas

Ventajas:

- ✓ Solo es necesario la eliminación del cableado de cada uno de ellas.
- ✓ La eliminación de su uso se puede hacer mediante software.

Desventajas:

- ✓ Dificultad para encontrar las señales inutilizadas.
- ✓ Posibilidad de desconexión de otras señales.
- ✓ Es necesario estudiar y analizar el programa presente en el PLC.

➤ Implementación de un nuevo cableado

Ventajas:

- ✓ Se realiza un realambrado del PLC a conveniencia.
- ✓ Se puede generar un programa para el PLC, sin la necesidad de estudiar el existente.
- ✓ Ayuda a cumplir con las exigencias de diseño para el proyecto.

Desventajas:

- ✓ Se pierde el alambrado ya existente.
- ✓ Se debe detener la máquina durante el tiempo de alambrado.

Se seleccionó la segunda opción. Debido a que, además, del rediseño del sistema de control, la empresa realizará también un cambio de la estructura física de la máquina, provocando la necesidad de un realambrado total. Por otra parte, para la segunda solución es necesaria una mayor intervención por parte del estudiante a cargo y sus criterios de diseño.

Al final, la suma de cada solución individual representa la propuesta total, que se caracteriza por la sustitución completa del programa de control implementado dentro del PLC; de tal manera, que se corrijan todos los inconvenientes que presentaba. Además, de la utilización al máximo de todas las ventajas presentes en el *variador* que se utiliza para el control de los motores.

El encargado de este proyecto necesito de ciertas cualidades para la implementación de la solución, entre ellas:

- ❖ Toma de decisiones basada en criterios de diseño, para la selección de la mejor solución.
- ❖ Identificación y optimización del proceso de inserción de bolsas plásticas en cajas de cartón.
- ❖ Programación del sistema de control en un PLC.
- ❖ Análisis critico de los resultados obtenidos durante las pruebas.

5.2 Descripción del hardware

La solución propuesta consiste en la utilización de un PLC para el control de la secuencia de pasos del proceso de inserción de bolsas plásticas. Este control consiste en la puerta en marcha, frenado y cambio de giro de los motores involucrados, junto a la activación y desactivación de las electroválvulas del sistema neumático. A continuación se presenta un diagrama de bloques para dar, a gran escala, una idea de lo que se realiza en este proyecto.

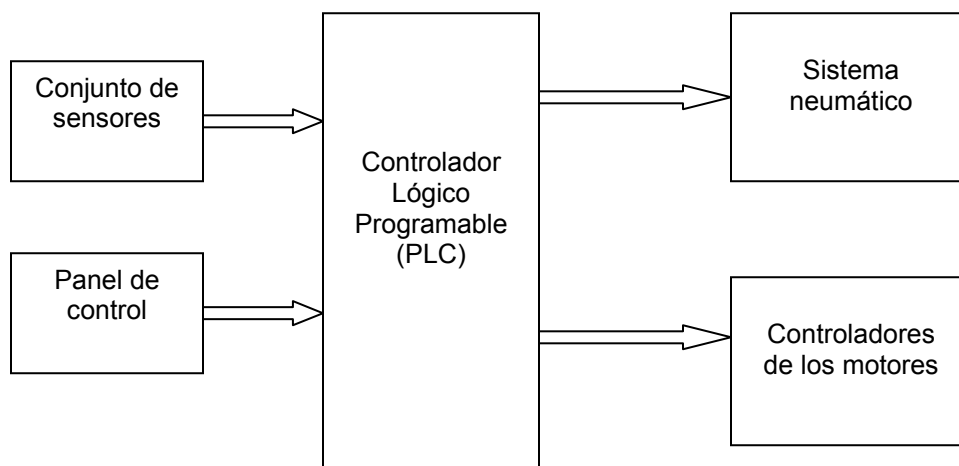


Figura 5.1 Diagrama de bloques del sistema de control electrónico implementado.

El conjunto de sensores es una mezcla de interruptores magnéticos y sensores ópticos. En el caso de los interruptores magnéticos, se utilizan tres tipos diferentes. Uno de ellos es el *M/50/LSU* de la marca *Norgren*, que son acoplables a todo tipo de guías neumáticas con pistón magnético.

Otro es el *M-40-2*, el cual se utiliza con la ubicación de imanes permanentes en las posiciones donde se desea que se activen. Finalmente, también se utilizan contactores magnéticos de la marca *SHIPA*, como sensores de seguridad para las puertas de la máquina insertadora de bolsas.

Los sensores ópticos son utilizados para la detección de las cajas cuando se encuentran en diferentes secciones del conveyor y lista para insertarle una bolsa.

El panel de control esta compuesto por un interruptor de tres posiciones para la escogencia del modo manual, automático o ninguno de los dos; un interruptor de seguridad para la alimentación eléctrica y siete botones: *START* (NA), *STOP* (NC), *JOG* (NA), *RESET* (NA), *BI conveyor* (NA), *ADC conveyor* (NA) y *EMERGENCY* (NC).

El sistema neumático:

“esta compuesto por un conjunto de regulación (regulado a 80 PSI) y filtro de aire y un modulo de arranque suave para evitar movimientos violentos e inadvertidos al restablecer la presión de alimentación a la máquina.

Además, tiene un manifold principal para el suministro a los actuadores..., y una alimentación directa de la línea principal a dos válvulas para la alimentación independiente y suficiente de las bombas de vacío de los conjuntos “RecogeBolsa” y “AbreBolsa”.¹⁵

¹⁵ Tomado del documento [2] citado en la bibliografía.

Las electroválvulas son utilizadas para controlar el movimiento de los brazos neumáticos, las ventosas y los pistones; involucrados en el proceso de inserción de bolsas. El símbolo y funcionamiento de las válvulas se describe en la sección 3.3 de este documento

Para el control de los motores se utilizan variadores de velocidad de CA *PowerFlex 4*, descritos en el marco teórico. Finalmente, el controlador lógico programable (PLC) utilizado es un *MicroLogix™ 1200*, de la marca *Allen-Bradley*.

En los Anexos 2 y 3, se encuentran los diagramas de entradas y salidas del PLC, que pueden ayudar a entender mejor el diagrama de la Figura 5.1.

5.3 Descripción del software

La descripción proceso de inserción de bolsas plásticas en cajas de cartón es mejor entendida mediante un diagrama de estados. En la Figura 5.2 (siguiente página) se muestran la serie de pasos que se deben seguir para realizar la inserción de la bolsa. Como se puede notar, esta figura combina algunos de los estados mostrados en la Figura 1.1, la razón es la optimización del proceso.

El cambio de estado considera todas las entradas del PLC, aunque no estén directamente relacionadas con el paso que se está realizando. En la Tabla 5.1 (página 39) se muestran los nombres y pines de conexión a las entradas y salidas del PLC.

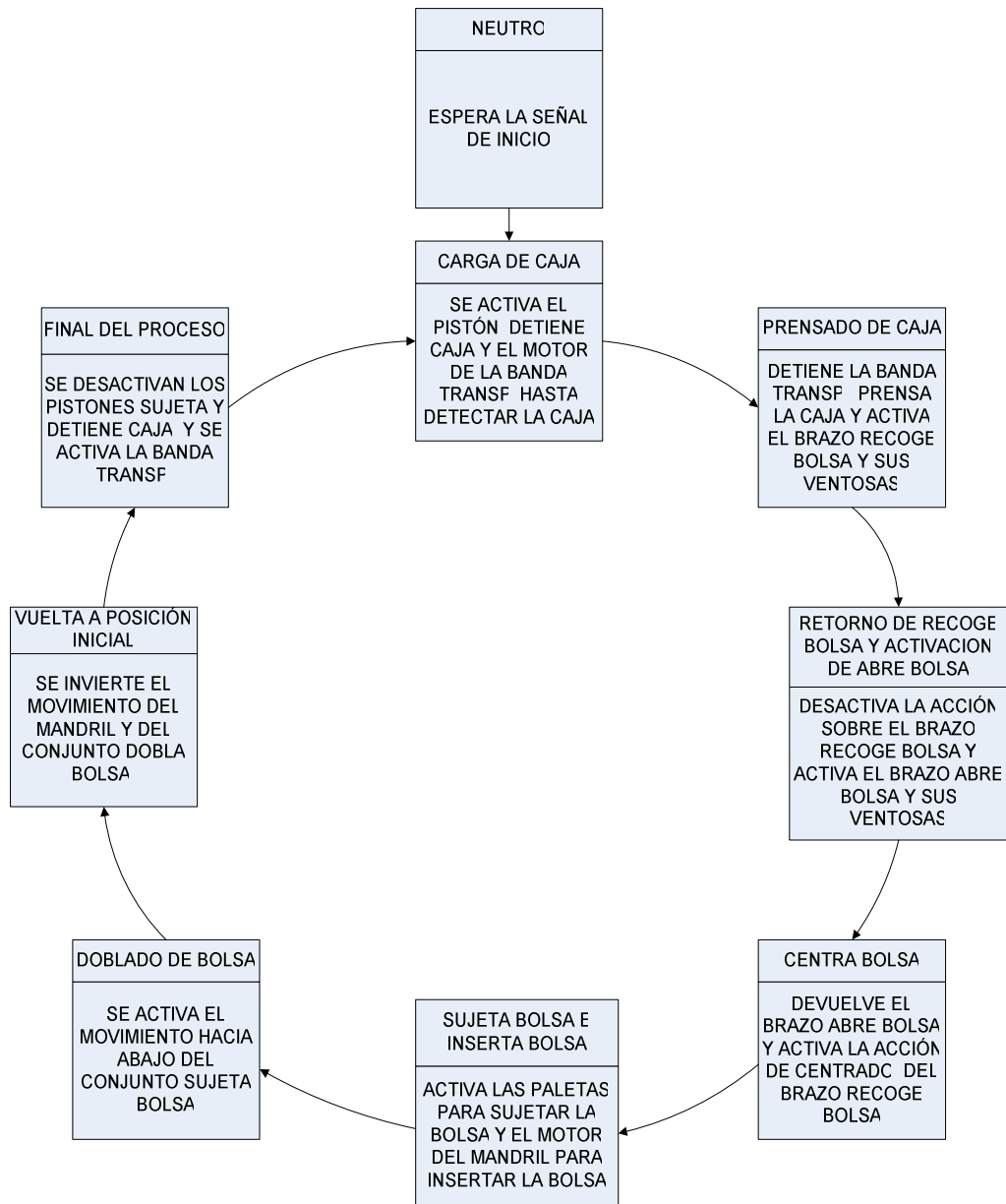


Figura 35.2 Diagrama de estados del proceso de inserción de bolsas plásticas en cajas de cartón.

Tabla 5.1 Entradas y salidas del PLC.¹⁶

| Entradas | | Salidas | |
|----------|----------------------------------|---------|--------------------------------|
| # | Descripción | # | Descripción |
| 0 | Caja presente | 0 | Dobla Bolsa |
| 1 | Recoge Bolsa (Arriba) | 1 | Sujeta Bolsa |
| 2 | Recoge Bolsa (Abajo) | 2 | Abre Bolsa |
| 3 | Sujeta Caja (Adentro) | 3 | Venturis Abre Bolsa |
| 4 | Centra Bolsa (Atrás) | 4 | Centra Bolsa |
| 5 | Centra Bolsa (Adelante) | 5 | Venturis Recoge Bolsa |
| 6 | Abre Bolsa (Atrás) | 6 | Recoge Bolsa |
| 7 | Abre Bolsa (Adelante) | 7 | Motor Banda Transportadora |
| 8 | Sujeta Bolsa (Afuera) | 8 | Parado de las cajas |
| 9 | Sujeta Bolsa (Adentro) | 9 | Sujeta Caja |
| 10 | Dobla Bolsa (Arriba) | 10 | Parada del Mandril |
| 11 | Dobla Bolsa (Abajo) | 11 | Mandril Forward (Hacia Abajo) |
| 12 | Mandril (Arriba) | 12 | Mandril Reverse (Hacia Arriba) |
| 13 | Mandril (Abajo) | 13 | Señal Luminosa |
| 14 | Inicio | 14 | |
| 15 | Parada o Puerta acceso delantero | 15 | |
| 16 | Selección Manual | | |
| 17 | Selección Automático | | |
| 18 | Reset o Puerta acceso posterior | | |
| 19 | Paso a Paso | | |
| 20 | Pulsador motor banda transp. | | |
| 21 | Pulsador motor del mandril | | |
| 22 | Parada de Emergencia | | |
| 23 | Nivel Bajo de bolsas | | |
| 1/0 | Final del conveyor ¹⁷ | | |
| 1/1 | Inicio del conveyor | | |
| 1/2 | Caja prensada | | |

¹⁶ En el Anexo 4 se encuentra una descripción mas detallada de cada una de las entradas y salidas descritas en esta tabla.

¹⁷ Ver apéndice A1.

Para esta máquina existen tres posibilidades de funcionamiento: modo automático, modo manual o simplemente traslado de cajas. A continuación se realiza una descripción de cada uno de los tres modos de funcionamiento.

a. Modo automático

En este modo cada cambio de estado es realizado por la activación y desactivación de las señales de los sensores. De tal manera que, la programación del modo automático en el PLC se realizó mediante una tabla comparadora de entradas, que a su vez controla la tabla de salidas del proceso. Todo como un proceso secuencial. A continuación se encuentran estas tablas.

Tabla 5.2 Entradas de sensores activas y desactivas necesarias para que se de cada estado del proceso de inserción de bolsas.

| Estado | Entradas del PLC | | | | | | | | | | | | | | Valor decimal |
|--------|------------------|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------|
| | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | |
| A(0) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B(1) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 4810 |
| C(2) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4811 |
| D(3) | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 6861 |
| E(4) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4783 |
| F(5) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4823 |
| G(6) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 9047 |
| H(7) | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 9551 |
| I(8) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4943 |

Tabla 1.3 Salidas activas y desactivas en cada estado del proceso de inserción de bolsas.

| Estado | Salidas del PLC | | | | | | | | | | | | | | | Valor decimal | | |
|--------|-----------------|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------|---|------|
| | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | | 0 | |
| A(0) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B(1) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 256 |
| C(2) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1216 |
| D(3) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1112 |
| E(4) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1136 |
| F(5) | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5236 |
| G(6) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1029 |
| H(7) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3076 |
| I(8) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 768 |

El valor decimal mostrado en cada una de las tablas es utilizado para la programación en el PLC, y se toma considerando la señal del pin más alto (segunda columna de izquierda a derecha) como el bit más significativo.

A parte de las entradas de los sensores, en el modo automático también se consideran las siguientes entradas del PLC:

- Inicio
- Parada o Puerta de acceso delantero
- Selección Manual (debe estar negada, "0" lógico)
- Selección Automático (debe estar activada, "1" lógico)
- Reset o Puerta de acceso posterior
- Parada de Emergencia
- Nivel bajo de bolsas
- Final del conveyor
- Inicio del conveyor

b. Modo manual

En este modo también se sigue la secuencia de pasos descritos en la Figura 5.2, la diferencia es que para el cambio de estado únicamente hace falta presionar el botón de *JOG* del panel de operación, conectado a la entrada *Paso a Paso* del PLC. Cada vez que se presione este botón se avanzara al siguiente estado, haciendo caso omiso de los sensores, con excepción de los sensores del *Mandril*. Estos dos sensores si son utilizados en el modo manual para controlar el sentido de giro y el paro del motor que controla el movimiento del *brazo inserta bolsa*.

Este modo de funcionamiento se puede utilizar para encontrar fallas en los sensores o en el programa del PLC. Pero, debido a que no consideran las señales de los sensores para el cambio de estado, la utilización del modo manual debe ser realizada solo por personal capacitado que tenga conocimiento de cada uno de los pasos que sigue el proceso de inserción del bolsas, con el fin de evitar daños a la máquina.

A parte de la entrada *Paso a Paso*, en el modo manual también se consideran las siguientes entradas:

- Mandril arriba
- Mandril abajo
- Selección Manual (debe estar activada, "1" lógico)
- Selección Automático (debe estar negada, "0" lógico)
- Reset o Puerta de acceso posterior
- Parada de Emergencia
- Nivel bajo de bolsas

c. Modo de traslado de cajas

En este modo de funcionamiento no se entra al ciclo de trabajo definido por el diagrama de estados (descrito en la Figura 5.2). Las únicas acciones realizadas en este modo son las de encendido y apagado del motor de la banda transportadora, junto a la activación y desactivación del pistón que sirve para detener las cajas (*Stopper o Parado de Cajas*).

De tal manera, que cuando se presiona el botón de *Inicio*, ubicado en el panel de operación, se activa el pistón de parada de cajas para que se baje y deje libre paso a las mismas, junto al encendido del motor de la banda transportadora. Con el fin de trasladar la cajas de la “máquina armadora de cajas” al conveyor.

Este modo de funcionamiento puede ser utilizado mientras se compra o consigue una posible pieza de la insertadora de bolsas para su sustitución, debido a algún daño.

A parte de las entradas descritas anteriormente, en este modo también se consideran las siguientes entradas:

- Parada o Puerta de acceso delantero
- Selección Manual (debe estar negada, “0” lógico)
- Selección Automático (debe estar negada, “0” lógico)
- Reset o Puerta de acceso posterior
- Parada de Emergencia
- Nivel bajo de bolsas
- Final del conveyor
- Inicio del conveyor

El programa del PLC desarrollado para el control del proceso de inserción de bolsas, es la unión de estos tres modos de funcionamiento, más una cuarta sección denominada *Inicialización*. Esta se utiliza para cargar las respectivas tablas de entradas y salidas (ver Tablas 5.2 y 5.3), en los archivos utilizados para el proceso secuencial. Además, de reiniciar todas las salidas. A esta sección de código se ingresa cuando se alimenta el PLC y cuando se presiona el botón de *Reset*.

Para la utilización y mantenimiento de esta máquina se desarrolló un manual, que comprende estos parámetros. El material no es incluido en este documento, pero a continuación se citan las secciones que contiene:

- Descripción del Hardware.
- Descripción del Software.
- Descripción de la secuencia de funcionamiento.
- Lista de parámetros para el mantenimiento preventivo.
- Lista de partes de recambio.
- Valores de los parámetros de programación para los variadores de los motores.
- Diagramas del sistema de control electrónico.

Capítulo 6: Análisis de resultados

6.1 Resultados

Prueba de continuidad de trabajo exento de fallas del nuevo software de control.

En la siguiente figura se describe los resultados obtenidos.

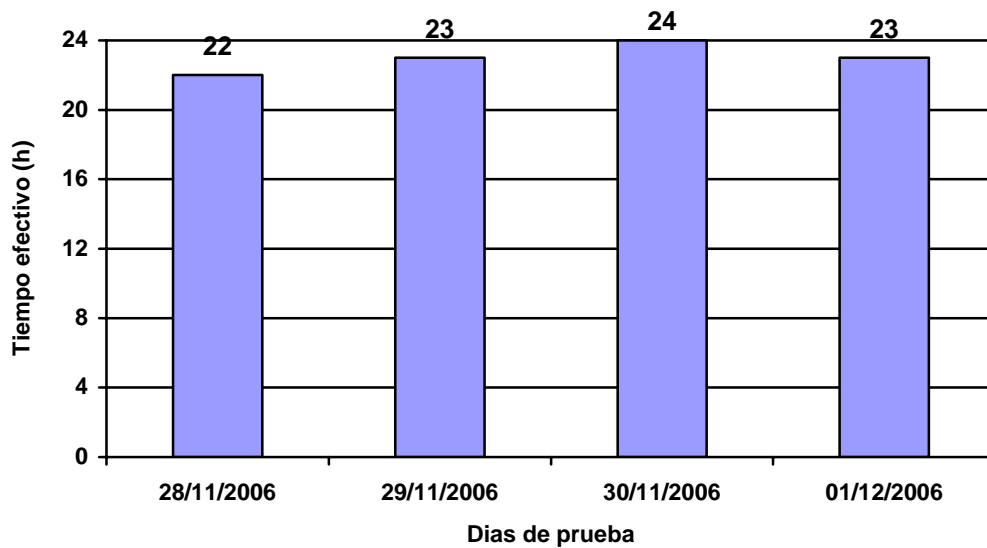


Figura 6.1 Tiempo efectivo de funcionamiento en primera etapa de prueba de cuatro días.

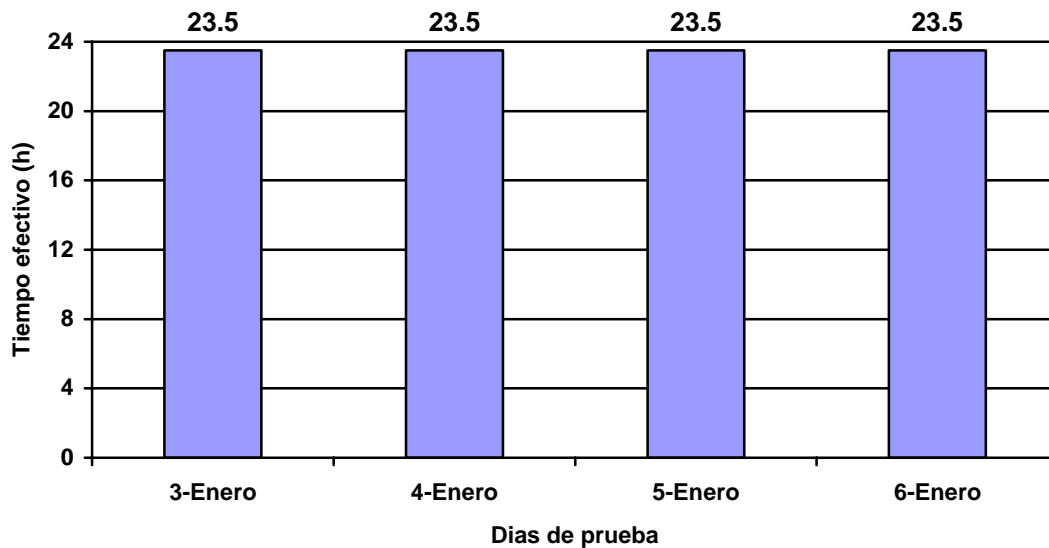


Figura 6.2 Tiempo efectivo de funcionamiento en segunda etapa de prueba de cuatro días.

Simulaciones de condiciones de error para observar el comportamiento de la máquina. A continuación se muestra una tabla con estas condiciones de error y la respuesta obtenida.

Tabla 2.1 Simulación de condiciones de error y respuesta obtenida.

| Condición de error simulada | Respuesta obtenida | | |
|--|--------------------|----------|----------|
| | 28/11/06 | 12/12/06 | 09/01/07 |
| Detuvo el proceso y activo la señal de alarma cuando ocurrió un error en el proceso | ✓ | ✓ | ✓ |
| Acciono la señal de alarma cuando se detiene la máquina. | ✗ | ✓ | ✓ |
| Detiene el proceso cuando se presiona <i>Stop</i> o se abre la puerta frontal. | ✓ | ✓ | ✓ |
| Si se detiene la máquina con <i>Stop</i> , reinicia el proceso en la última posición después de presionar <i>Start</i> | ✗ | ✓ | ✓ |
| Si se presiona <i>Parada de emergencia</i> detiene el proceso inmediatamente y desactiva las salidas de los actuadores | ✓ | ✓ | ✓ |
| Si se presiona <i>Parada de emergencia</i> se activa la alarma | ✗ | ✓ | ✓ |
| Detiene el proceso cuando se considera un nivel bajo de bolsas | ✗ | ✗ | ✓ |
| No empieza el proceso si se tiene activada la señal de paro, paro de emergencia o la puerta frontal abierta. | ✓ | ✓ | ✓ |
| Vuelve a su posición inicial de cualquier punto, luego de presionar <i>reset</i> | ✓ | ✓ | ✓ |
| Reinicia todas las variables internas con <i>Reset</i> | ✗ | ✓ | ✓ |
| Detiene el proceso cuando se prensa una caja en la salida | ✗ | ✓ | ✓ |
| Detiene el proceso cuando el conveyor se encuentra lleno de cajas. | ✓ | ✓ | ✓ |
| Reinicia el proceso cuando se quita las cajas del final del conveyor | ✗ | ✓ | ✓ |
| Todos los actuadores vuelven a su posición inicial con <i>reset</i> sin problemas. | ✓ | ✓ | ✓ |
| Se elimina la falla del insertado de las bolsas, por problemas al sujetarla | ✗ | ✓ | ✓ |

Donde:

✗ = Condición no cumplida

✓ = Condición cumplida

Porcentaje de tiempo necesario para completar cada subprocesso. El tiempo total es de 18.7 segundos, para el 8/01/07.

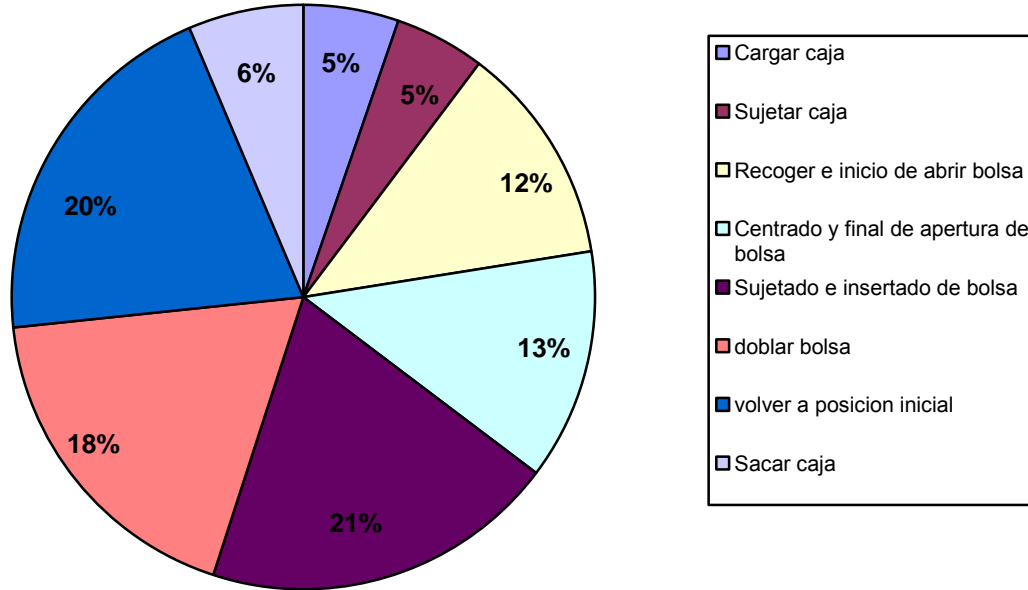


Figura 6.3 Porcentaje de tiempo de cada etapa del proceso de inserción de bolsas.

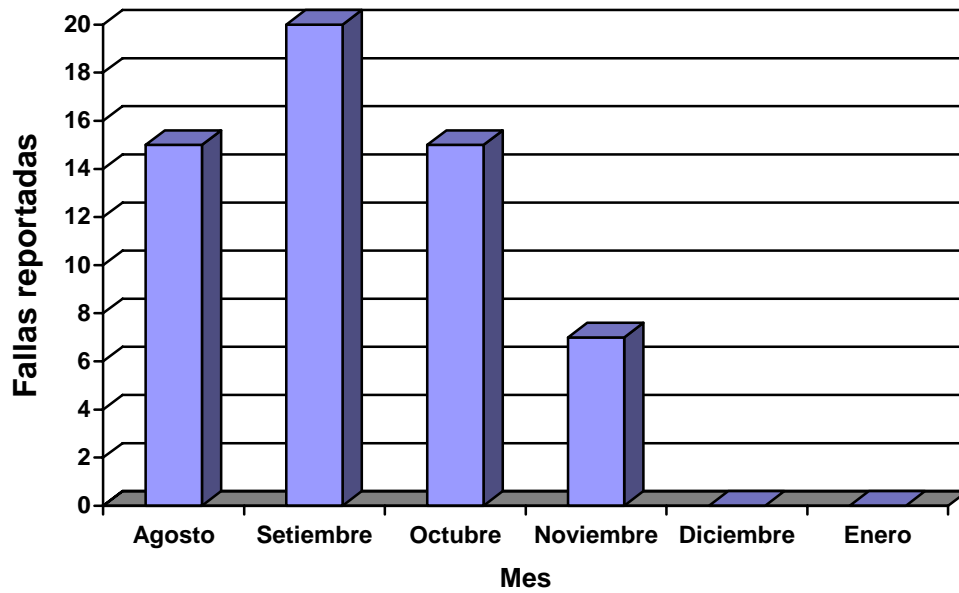


Figura 6.4 Fallas de funcionamiento por mes, de la máquina insertadora de bolsas.

Otros resultados importantes de analizar son los tiempos de retardo, involucrados en cada una de las acciones del proceso de inserción de bolsas. A continuación se muestran figuras donde se detallan algunos de estos tiempos.

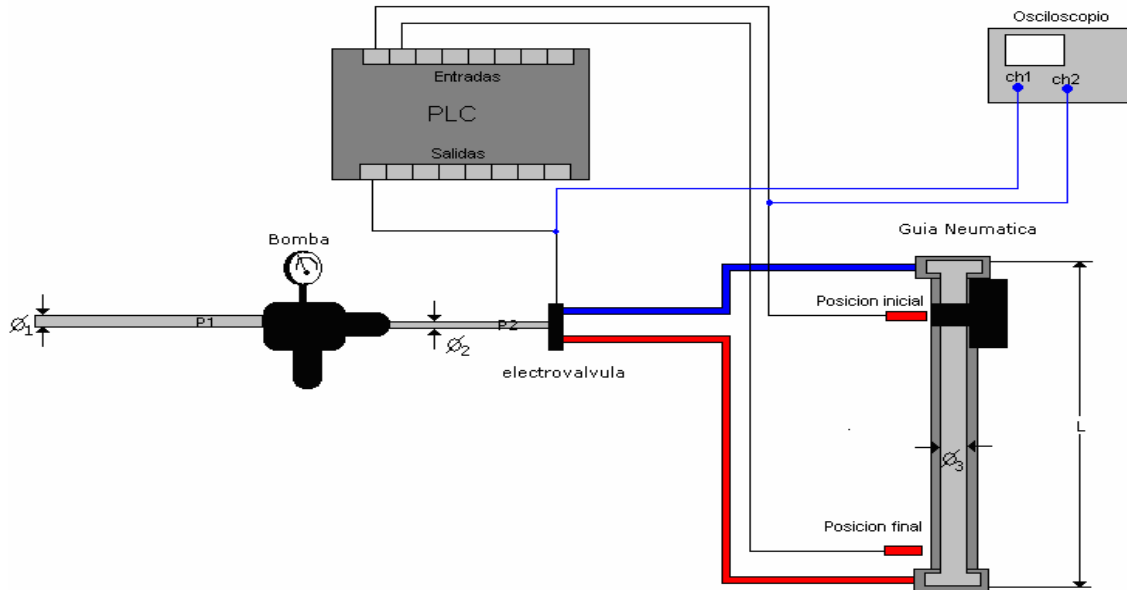


Figura 6.5 Diagrama de conexión para la medición del tiempo de retardo de un sistema neumático.

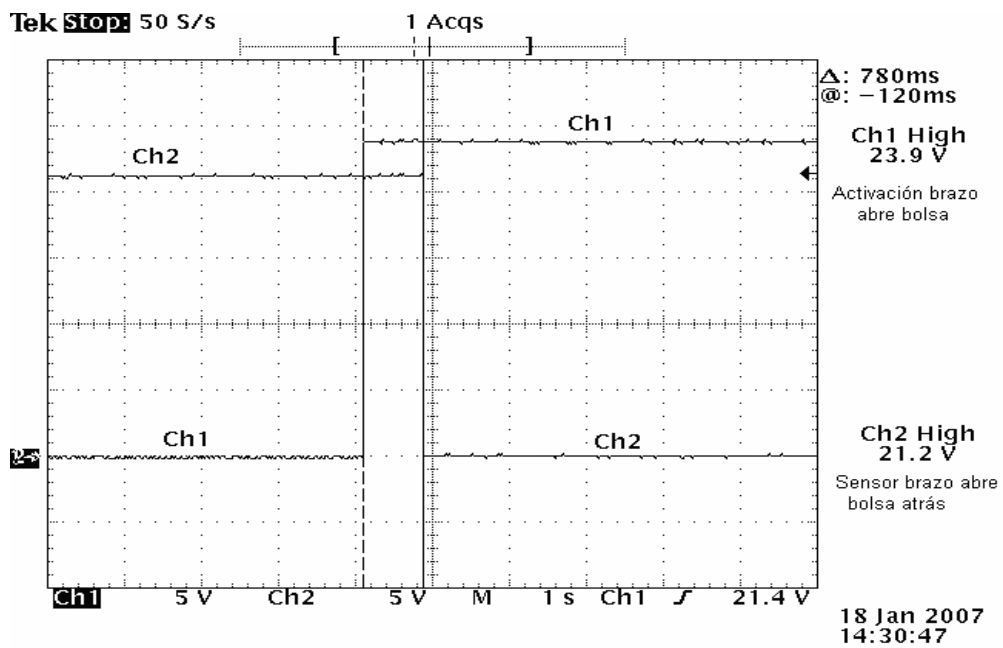


Figura 6.6 Comparación entre la salida hacia el brazo abre bolsa y el sensor que marca su posición inicial (abre bolsa atrás).

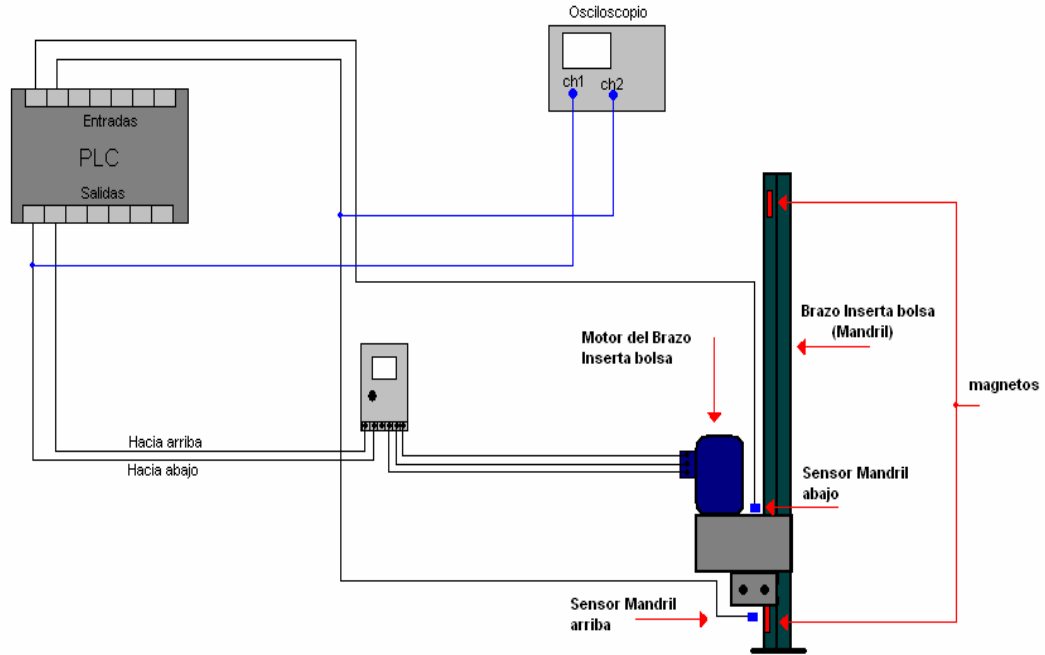


Figura 6.7 Diagrama de conexión para la medición del tiempo de retardo de un sistema mecánico.

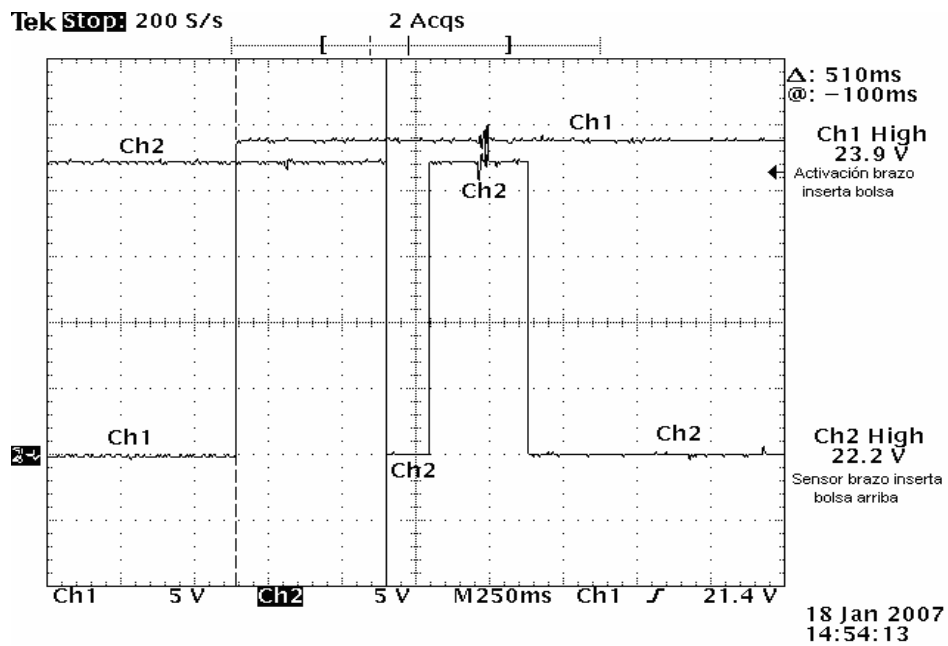


Figura 6.8 Comparación entre la salida hacia el brazo inserta bolsa y el sensor que marca su posición inicial (inserta bolsa arriba).

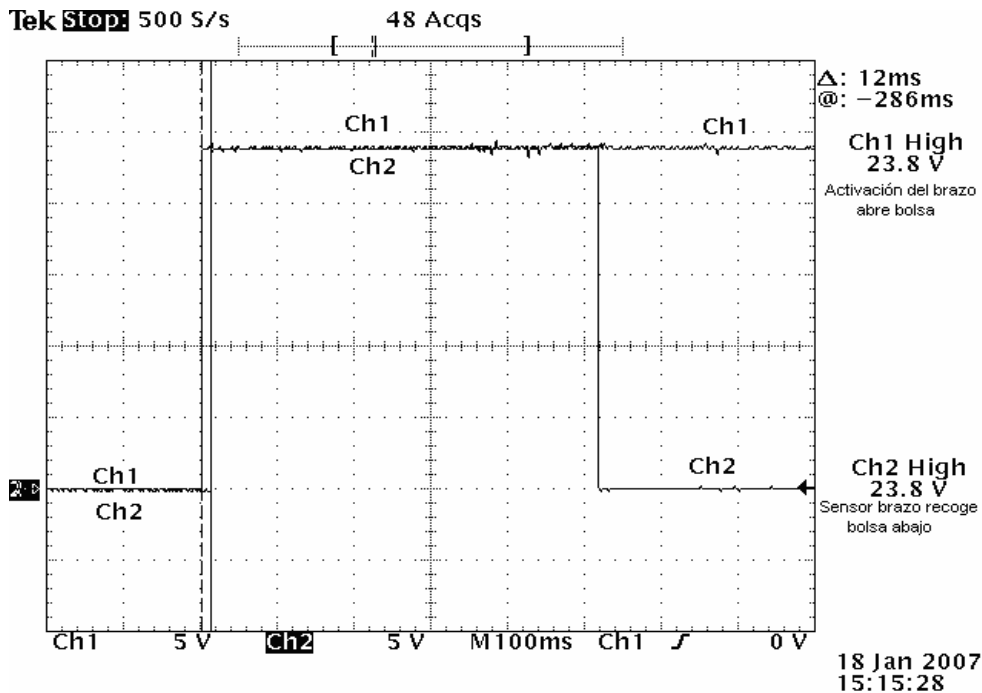


Figura 6.9 Comparación entre la salida hacia el brazo abre bolsa y el sensor que marca cuando el brazo recoge bolsa esta abajo (recoge bolsa abajo).

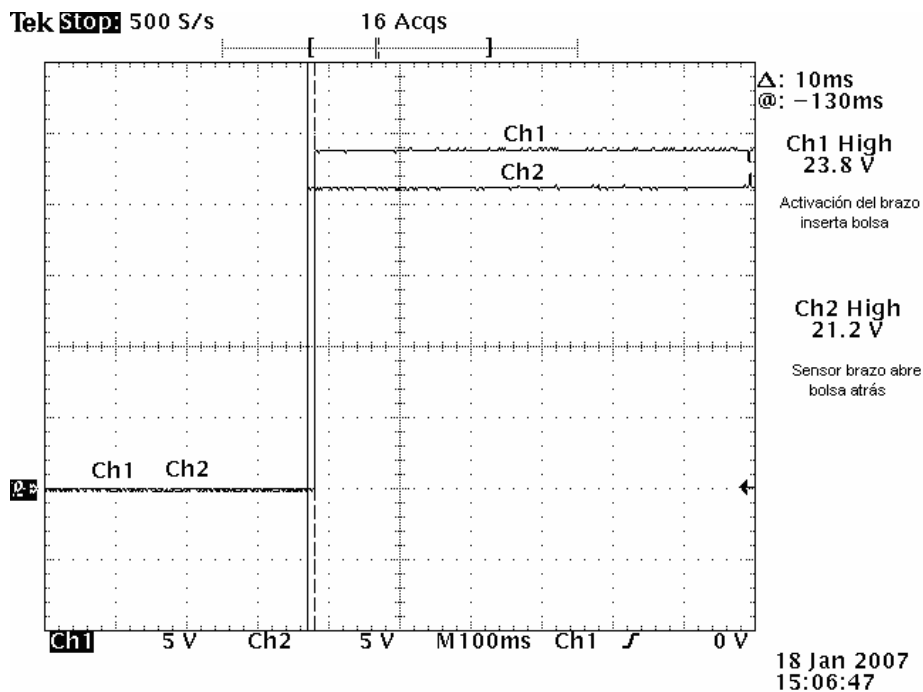


Figura 6.10 Comparación entre la salida hacia el brazo inserta bolsa y el sensor que marca la posición inicial del brazo abre bolsa (abre bolsa atrás).

6.2 Análisis

El primer punto por analizar es el tiempo ininterrumpido de funcionamiento. Para esta prueba, se expuso la máquina insertadora de bolsas a la jornada de trabajo ordinaria que tendría durante un lapso de 4 días. Los resultados obtenidos en la primera de estas pruebas se muestran en la grafica de la Figura 6.1. Se puede notar que el tiempo de funcionamiento sin interrupciones cumple con los requerimientos de la empresa. Ya que en base a las siguientes ecuaciones:

$$t_{prom} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad (6.1)$$

$$\%Func = \frac{t_{prom}}{t_{Total}} * 100 \quad (6.2)$$

Donde: t_n = tiempos de funcionamiento ininterrumpido por día.
 t_{prom} = tiempo promedio de funcionamiento ininterrumpido por día.
 t_{Total} = tiempo total por día de trabajo.
 $\%Func$ = porcentaje de tiempo ininterrumpido por día de trabajo.

Se tiene un tiempo promedio de funcionamiento de 23 horas. Con lo cual se obtiene un 95.83% de tiempo ininterrumpido por día de trabajo.

Para la segunda ocasión en la cual se realizó las mismas pruebas, ver Figura 6.2, se mejoró la eficiencia del proceso. Ya que se obtuvo un tiempo promedio de 23.5 horas, dando un 97.92% de tiempo ininterrumpido por día de trabajo. El tiempo en el cual se detuvo la máquina insertadora de bolsas corresponde al requerido para el mantenimiento preventivo y revisión de funcionamiento diario, recomendado por el estudiante.

Esta primera prueba de funcionamiento no considera las fallas del producto final, que para este caso es la caja de cartón con la bolsa insertada. Este problema recaía en ajustes mecánicos a la máquina, y por tal razón no se consideran como parte de los resultados.

Por otra parte, se trato de calcular el rendimiento del proceso, para lo cual, se midieron los intervalos de tiempo necesarios para cumplir con cada una de las etapas involucradas. Que sumados dan un total de 18.7s. Los resultados obtenidos se muestran con la grafica de la Figura 6.3. De esta grafica se nota que los pasos para el insertado de la bolsa y retorno al punto inicial, son los estados donde se consume la mayor cantidad de tiempo.

Y considerando la descripción de cada subproceso, se nota que en estas dos etapas es donde se ve involucrado el accionar del *mandril* (*Brazo Inserta Bolsa*). Concluyendo que el tiempo gastado en cada una de estas etapas es el necesario para que el motor del *mandril* lleve a este de arriba a abajo, y viceversa. Mientras que, cuando solo se ve involucrado el movimiento neumático (exceptuando la primera y última etapa), el tiempo necesario para completar la acción es menor. Además, la velocidad de cada acción neumática es simple de ajustar, mediante el aumento o disminución de la presión en la bomba de aire. Pero cuando se aumentó provoco un incremento de fallas en el producto final. En base a la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{60}{T} \quad (6.3)$$

Donde:

σ : Cantidad de bolsas por minuto.

T : Tiempo, en segundos, necesario para completar un ciclo.

Se obtiene un rendimiento de 3.21 bolsas por minuto, dando un total de aproximadamente 192 bolsas insertadas en cajas de cartón por hora. Superando el rendimiento anterior, el cual era de 2.5 bolsas insertadas por minuto.

Luego, se expuso a la máquina a condiciones frecuentes de error, encontradas por los encargados del piso de producción. En la tabla 6.1, se encuentran descritos cada uno de estas condiciones y el resultado obtenido.

Al principio aun existieron condiciones de error sin resolver. Pero la mayoría fueron corregidas con éxito, para la segunda fecha de pruebas. Quedando únicamente la necesidad de detener el proceso cuando se determina un nivel bajo de bolsas, el cual no se había implementado debido a la falta del sensor correspondiente.

Para la tercera fecha de pruebas, cuando ya se contaba con el sensor faltante, la máquina insertadora de bolsas actuó correctamente ante todas las condiciones de error simuladas. Cumpliéndose con esto el objetivo de aumentar la eficiencia del proceso, en cuanto a respuesta frente a posibles condiciones de error. Además, con estas pruebas se comprueba la efectividad del programa de control implementado en el PLC.

En la Figura 6.4 se representan las fallas de funcionamiento por mes de la máquina insertadora de bolsas, antes y después de la intervención del estudiante, la cual empezó a mediados de noviembre. Como se puede notar, durante el mes de diciembre y lo que llevamos de enero la máquina no ha presentado fallas en el proceso. Contrario a los meses de agosto, setiembre y noviembre.

Con lo cual, hasta el momento, se sobrepasan las expectativas del rendimiento esperado. El cual era de un 98% de tiempo exento de fallas por mes. Obteniendo un 100% de tiempo de funcionamiento sin la necesidad de reparaciones.

Por otra parte, en las figuras 6.6 y 6.8 se muestran los tiempos de reacción de dos de las acciones involucradas en el proceso de inserción de bolsas. Los cuales fueron medidos en base a los diagramas de las figuras 6.5 y 6.7, considerando la salida hacia los actuadores como referencia y el sensor que marca la posición actual, de los brazos que se activan, como salida.

El primer caso (ver Figura 6.6), representa la acción de un sistema neumático, donde el tiempo de retardo es de 780ms, que corresponde al tiempo necesario para que el brazo encargado de abrir la bolsa salga del rango de activación del sensor que marca su posición actual. Es decir, el tiempo que dura para activarse y abrirse la electroválvula, provocando el movimiento del pistón neumático.

Además, con esta misma grafica se logró obtener le modelo matemático correspondiente. Para lo cual se utilizó un programa realizado en Matlab¹⁸, obteniendo como resultado el modelo representado en la siguiente ecuación.

$$\frac{-0.0015122}{z^2 (z-0.9984)} \quad (6.4)$$

$T_{\text{muestreo}}: 0.01 \text{ s}$

Para el caso de la Figura 6.8, que representa una acción mecánica, el retardo es de 510ms, que corresponde al tiempo necesario para que el brazo encargado de insertar la bolsa salga del rango de activación del sensor que marca su posición actual. Tiempo correspondiente a la activación y puesta en marcha del motor que provoca el movimiento del brazo mecánico.

Se puede observar que por un breve momento el sensor vuelve a activarse (ch2). No obstante esta activación se da luego de empezar el movimiento hacia abajo del brazo inserta bolsa y por lo tanto no se considera dentro del rango del tiempo de retardo.

¹⁸ El cual se puede conseguir mediante el link de Internet [8] citado en la bibliografía.

Del mismo modo, que para la acción neumática, se obtuvo el modelo matemático correspondiente. El cual se describe con la ecuación 6.5.

$$\frac{0.0094035 (z-1.068)}{z^2 (z-0.9965) (z+0.006417)} \quad (6.5)$$

$T_{\text{muestreo}}: 0.01 \text{ s}$

Estos dos tiempos son relevantes para indicar, que a pesar de tratarse de un control encendido/apagado (ON/OFF), las acciones neumáticas y mecánicas no son inmediatas. Si no, que presentan un tiempo de retardo correspondiente a las diferentes activaciones de los actuadores.

Las figuras 6.9 y 6.10 miden el tiempo de retardo provocado por el PLC. El primero es de 12ms, que corresponde al tiempo necesario para activar la acción de abrir la bolsa, una vez que la última condición necesaria se cumple (el brazo recoge bolsa se encuentra abajo).

Para el caso de la activación del motor del brazo inserta bolsa, el tiempo medido es de 10ms, correspondiente al tiempo que le tardo al PLC dar la acción de arranque del motor, una vez que se cumplieron todas las condiciones necesarias. Que para este caso fueron representadas por la señal del sensor “abre bolsa atrás”.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Se logró implementar un sistema de control para la máquina encargada de insertar bolsa plásticas en cajas de cartón. El cual, incluyó el cableado de los sensores y botoneras necesarias para el control del proceso, junto a las salidas hacia las electroválvulas y variadores de CA, utilizados como actuadores.

Con este control se logró aumentar la eficiencia del proceso de inserción de bolsas plásticas en cajas de cartón, en cuanto al tiempo ininterrumpido de funcionamiento, a un 97.92% y en cuanto al tiempo de funcionamiento exento de fallas, a un 100%. Por otra parte, con el desarrollo del nuevo programa para el PLC y su optimización se logró aumentar el rendimiento la máquina, al pasar de 2.5 bolsas a 3.21 bolsas insertadas por minuto.

Se logró eliminar la mayoría de los gastos provocados por el mal funcionamiento de la máquina, generando un ahorro, aproximado de ¢ 2 650 000 mensuales. En cuanto a reparación, detención del proceso y contratación de nuevo personal.

Finalmente, se desarrolló un manual de usuario para la empresa, en el cual se detallan las etapas involucradas en el proceso de inserción de bolsas. Junto a tablas que pueden ser utilizadas para controlar el mantenimiento preventivo y reparación de la máquina, para lo cual también se incluyeron diagramas eléctricos de todo el sistema de control.

7.2 Recomendaciones

Una de las principales recomendaciones es el reforzamiento de la estructura física de la máquina insertadora de bolsas. Ya que, éste puede ayudar a evitar la vibración y oscilamiento de la estructura. Con lo cual, se puede volver a probar la posibilidad de aumentar la presión para los movimientos neumáticos.

Es necesario que se realice un mantenimiento semanal al sistema neumático para evitar problemas de mala inserción de bolsas. Además de un mantenimiento preventivo al cableado de la máquina, al menos cada 15 días, para evitar problemas de control.

Bibliografía

- [1] WIKIPEDIA, “la enciclopedia libre” [en línea]. *Controlador lógico Programable*. 5 septiembre 2006. <http://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_l%C3%B3gico_programable>. [Consulta: 20 septiembre 2006]
- [2] Pérez, Alberto. **Manual de operación y mantenimiento. Insertadora de Bolsas (Bag Inserter) BI-100**. ALCOA CSI de Centroamérica, Departamento de Producción.
- [3] ALCOA CSI de Centroamérica [en línea]: ALCOA en Costa Rica. <http://www.alcoa.com/costa_rica/es/home.asp>. [Consulta: 16 septiembre 2006]
- [4] Petruzella, Frank D. **Programable Logic Controller**. 2ª Ed. New York: GLENCOE; McGraw-Hill, c1998.
- [5] Chapman, Stephen J. **Máquinas eléctricas**. México: Mc Graw-Hill, 1988.
- [6] Wildi, Theodore; De Vito, Michael J. **Control de motores industriales**. México: Limusa; Noruega.
- [7] Bolton, William. **Mechatronics, Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering**. 3a ed. Versión en español. Alfaomega, 2006.
- [8] Escuela de Ingeniería Electrónica, Eduardo Interiano, control automático [en línea]: stochastic2. zip . Modificado por Eduardo Interiano, 2006. <<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/trabajosmatlab/>>. [Consulta: 20 enero 2007]

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

TEC: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

PLC: Controlador Lógico Programable, por sus siglas en Inglés Programmer Logic Controller.

NA: Normalmente abierto.

NC: Normalmente cerrado.

I/O: Entrada/Salida, por sus siglas en inglés Input/Output.

Mandril: Nombre que se le da al brazo inserta bolsa.

AC: Corriente alterna, por su siglas en inglés *Alternate Current*.

CD: Corriente directa.

A.2 Información sobre la empresa

A.2.1 Descripción de la empresa

La empresa en donde se realizará el proyecto es la fábrica ubicada en Costa Rica de ALCOA CSI de Centroamérica, ésta se encuentra en el Parque Industrial de Cartago, cuya dirección exacta es: Av. Las Américas, Bodega 54 A,B,C y D.

La actividad principal de ALCOA CSI de Centroamérica, ubicada en Costa Rica, es la fabricación de tapa-roscas para bebidas, de la marca Coca Cola y Pepsi. Para este proceso se cuenta con 52 empleados.

A.2.2 Descripción del departamento en la que se realiza el proyecto

El proyecto que se está realizando pertenece al departamento de producción. Este departamento es uno de los más grandes de la empresa, es el encargado de todo el proceso de creación de la tapa-roscas, desde su forma, color, tamaño, espesor, impresión y almacenamiento.

La mayoría de los procesos se realizan en forma automática, mediante sofisticas máquinas y sistemas de traslación. Sin embargo, el número de empleados en esta área es relativamente alto, éste es de 30.

El encargado directo de este departamento es Fernando Sánchez Barquero, quien ocupa el puesto de Superintendente de Producción. Y por ende, es el encargado de controlar y ayudar en la realización del proyecto.

A.2.3 Antecedentes prácticos

La solución del problema, provocado por el mal funcionamiento de la máquina insertadora de bolsas, había sido entregada por completo al señor Alvaro Perez. Quien es el diseñador y vendedor de la máquina, también encargado de corregir las constantes fallas.

No obstante, a pesar de las continuas visitas de este señor, nunca se logró alcanzar las expectativas de funcionamiento pretendidas por la empresa. Y por esta es la primera intervención directa por parte de la empresa para la solución del problema.

A.3 Tablas representativas de los gastos provocados por la máquina.

Tabla A3.1 Gastos provocadas por mantenimiento y repuestos.

| Precio de adquisición de la máquina | Inversión en mantenimiento por año | | Inversión total en mantenimiento |
|-------------------------------------|------------------------------------|-------------|----------------------------------|
| | Año 2005 | Año 2006 | |
| ¢ 11.176.650 | ¢ 1.227.834 | ¢ 2.500.000 | ¢ 3.727.834 |

Tabla A3.2 Gastos por modificación a las bolsas.

| Costos de bolsas | | Consumo de bolsas/ mes | Pérdidas/ mes | Pérdidas/ anual |
|------------------|------------|------------------------|---------------|-----------------|
| Normal | Modificada | | | |
| ¢ 80 | ¢ 96 | 50.000 | ¢ 800.000 | ¢9.600.000 |

Tabla A3.3 Gastos por daño a las bolsas.

| Costos de bolsas | # bolsas de Desperdicio/ día | Pérdidas/ mes | Pérdidas/ anual |
|------------------|------------------------------|---------------|-----------------|
| ¢ 96 | 32 | ¢ 95.232 | ¢1.121.280 |

Tabla A3.4 Gasto adicional en personal para insertar la bolsa.

| Pago diario | Pérdidas/ mes | Pérdidas/ anual |
|-------------|---------------|-----------------|
| ¢42.720 | ¢ 1.324.320 | ¢15.592.800 |

A.4 Análisis matemático del sistema neumático.¹⁹

La bomba de aire se puede representar como una resistencia que disminuye la presión de aire. Y se puede despreciar la inercia debido a que el gasto cambia en forma muy lenta.

Por lo tanto se tiene que:

$$p_1 - p_2 = R \dot{m}$$

Para el tramo entre la bomba y la electroválvula, el gas permanece allí, ya que no tiene salida. La capacitancia de esta tubería esta dada por

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = (C_1 + C_2) \frac{\partial p_2}{\partial t}$$

Como la masa que sale del tubo es cero se tiene que:

$$\dot{m} = (C_1 + C_2) \frac{\partial p_2}{\partial t} \Rightarrow \frac{p_1 - p_2}{R} = (C_1 + C_2) \frac{\partial p_2}{\partial t}$$

Así que:

$$p_1 = R(C_1 + C_2) \frac{\partial p_2}{\partial t} + p_2$$

Para este caso no es necesario describir la extensión o contracción de la manguera, debido a que la resistencia de la misma evita tales acciones. Es importante anotar que la presión después de la bomba es de 80 psi.

Para el caso de la guía neumática se tiene que:

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = pA$$

De tal manera que la fuerza ejercida sobre el pistón es proporcional a la presión del aire de entrada y al área de la guía neumática. La cual es constante.

¹⁹ Basado en el documento [7] citado en la bibliografía. Pag 201 y 202.

Además, se puede realizar un análisis de cómo la presión de entrada afecta la velocidad del pistón neumático:

$$F = m * a$$

$$L = V_o t + \frac{1}{2} a t^2$$

Para este caso $V_o = 0$, entonces:

$$L = \frac{1}{2} a t^2 \Rightarrow a = \frac{2L}{t^2}$$

Por lo tanto:

$$F = m * \frac{2L}{t^2}$$

$$p_2 A = m * \frac{2L}{t^2}$$

$$t = \sqrt{m * \frac{2L}{p_2 A}}$$

Pero como es un gas la masa de este es también variable, debido a su cualidad de compresibilidad.

$$t = \sqrt{\dot{m} * \frac{2L}{p_2 A}}$$

Anexos

Anexo 1. Fotografías de la máquina insertadora de bolsas



Foto del sistema de control (PLC, relays, etc)

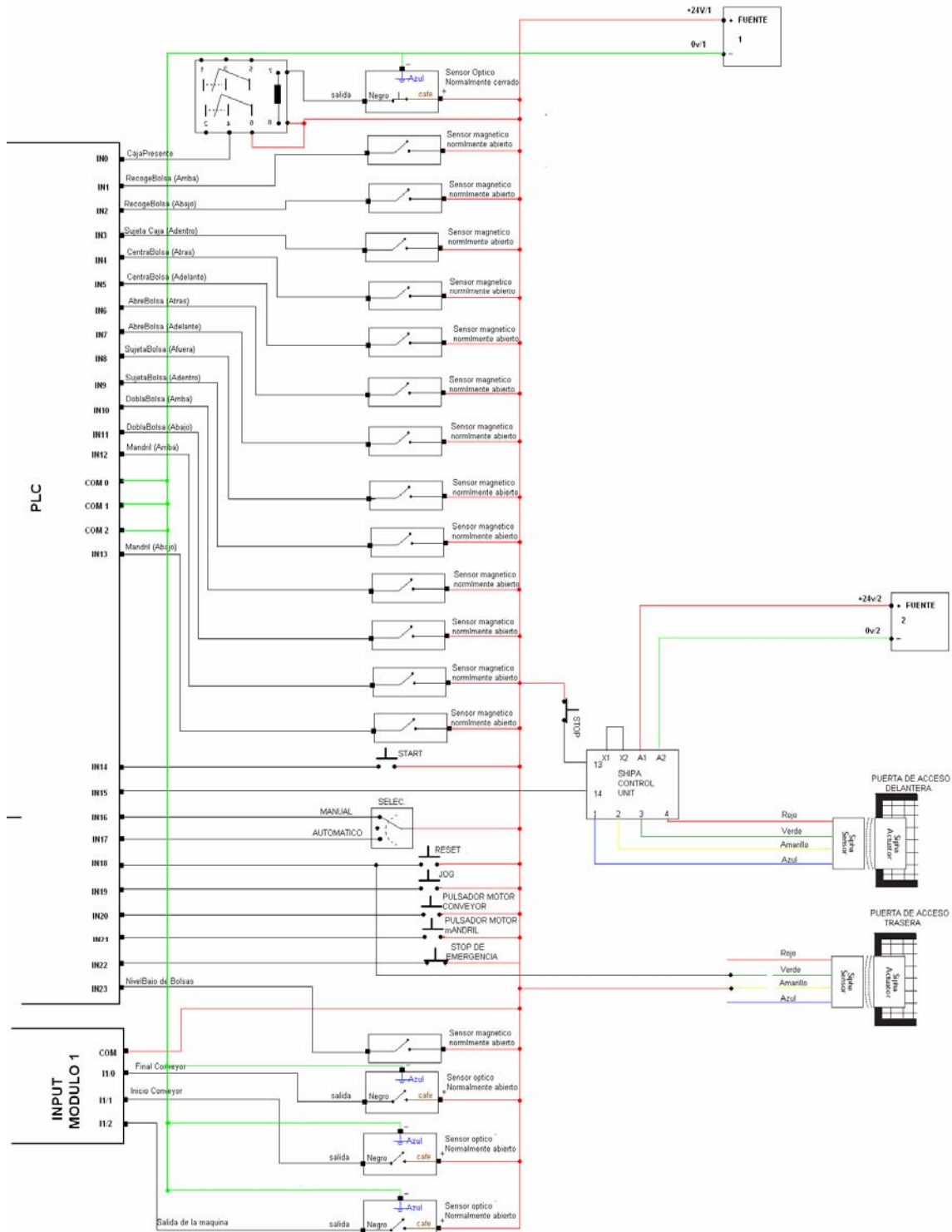


Foto del sistema neumático (Bomba, válvulas, etc)

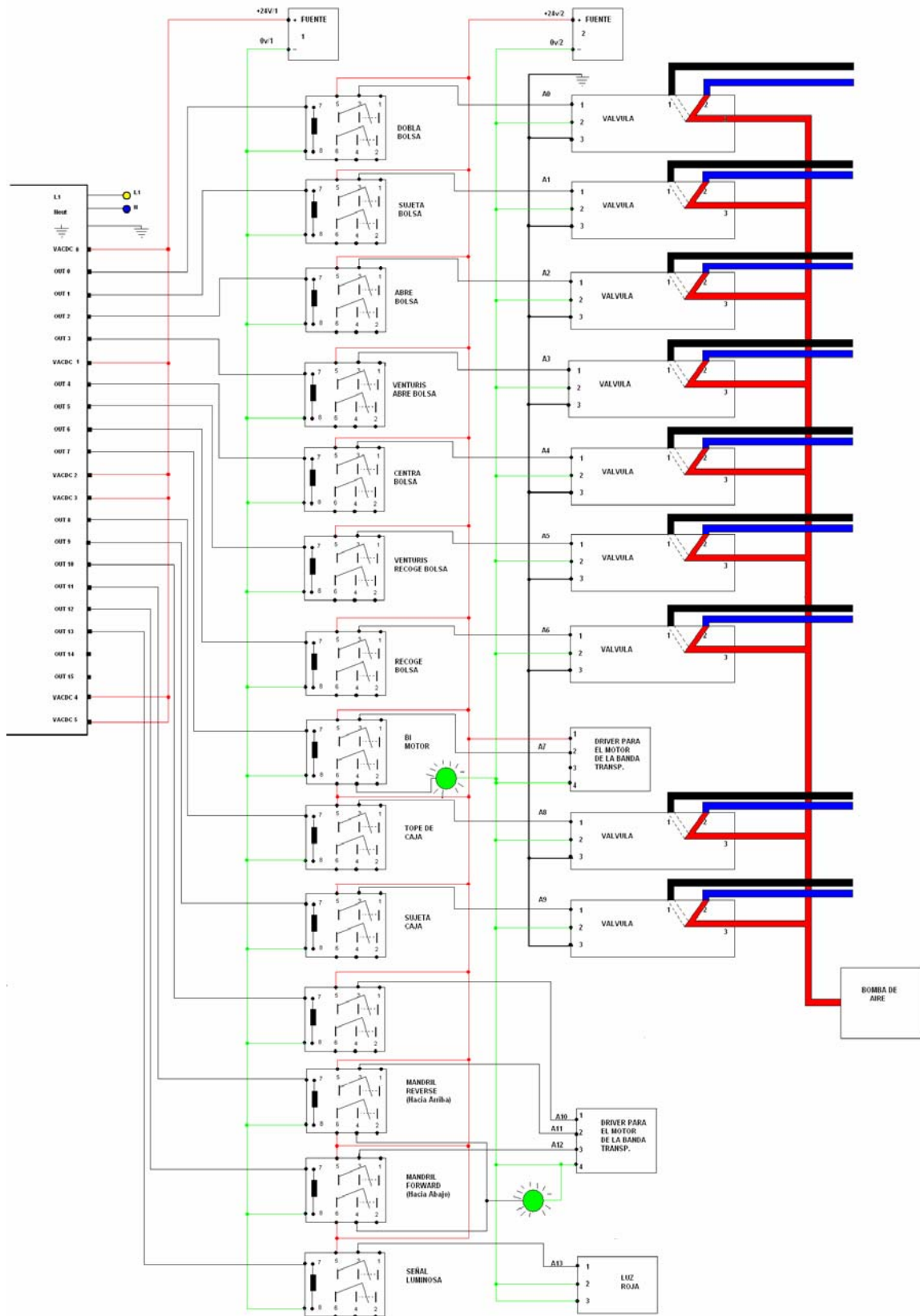


Foto de la máquina insertadora de bolsas

Anexo 2. Diagrama de entradas del PLC.



Anexo 3. Diagrama de salidas del PLC.



Anexo 4. Descripción de las estradas y las salidas del PLC.

Entradas

Caja Presente: Sensor óptico normalmente abierto que se activa cuando detecta una caja.

Recoge Bolsa Arriba o Abajo: Sensores magnéticos normalmente abiertos que se activan cuando el brazo neumático que recoge la bolsa se encuentra arriba o abajo, respectivamente.

Sujeta Caja: Sensor magnético normalmente abierto que se activa cuando el pistón para sujetar la caja se encuentra arriba o abajo, respectivamente.

Recoge Bolsa Arriba o Abajo: Sensores magnéticos normalmente abiertos que se activan cuando el brazo neumático que recoge la bolsa se encuentra arriba o abajo, respectivamente.

Centra Bolsa Atrás o Adelante: Sensores magnéticos normalmente abiertos que se activan cuando el brazo neumático que centra la bolsa se encuentra atrás o adelante, respectivamente.

Abre Bolsa Atrás o Adelante: Sensores magnéticos normalmente abiertos que se activan cuando el brazo neumático que abre la bolsa se encuentra atrás o adelante, respectivamente.

Sujeta Bolsa Afuera o Adentro: Sensores magnéticos normalmente abiertos que se activan cuando las paletas que sujetan la bolsa encuentra afuera o adentro, respectivamente.

Dobla Bolsa Arriba o Abajo: Sensores magnéticos normalmente abiertos que se activan cuando el brazo neumático que dobla la bolsa se encuentra arriba o abajo, respectivamente.

Mandrill Arriba o Abajo: Sensores magnéticos normalmente abiertos que se activan cuando el brazo, movido por un motor, para insertar la bolsa se encuentra arriba o abajo, respectivamente.

Inicio: Botón normalmente abierto, que se utiliza para inicializar el proceso de insertar la bolsa en modo manual o para activar el motor de la banda transportadora y el pistón de *stopper*, cuando la máquina se encuentra en el modo de traslado de caja.

Parada o Puerta de delantero: Botón normalmente cerrado colocado en combinación con un conector magnético, ubicado en la puerta delantera de la máquina. Utilizado para detener el proceso de inserción de la bolsa en el modo automático.

Selección Manual o Automático: Perillas de tres posiciones: modo manual, modo automático o ninguno de los dos.

Reset o Puerta de acceso posterior: Botón normalmente abierto colocado en paralelo con un conector magnético, también, normalmente abierto, ubicado en la puerta posterior de la máquina. Utilizado para reiniciar todas las secciones de la máquina a sus posiciones iniciales.

Paso a Paso: Botón normalmente abierto (JOG), utilizado para realizar la secuencia de pasos en modo manual.

Pulsador motor banda transportadora: Botón normalmente abierto, utilizado para encender y apagar el motor de la banda transportadora, el cual solo funciona en modo manual.

Pulsador motor del mandril: Botón normalmente abierto, utilizado para encender y apagar el motor del mandril, el cual solo funciona en modo manual.

Parada de Emergencia: Botón normalmente cerrado, utilizado para detener inmediatamente cualquier acción que se este realizando y en cualquier modo de funcionamiento. El cual a su vez presenta un seguro para permanecer abierto una vez presionado, hasta que se mueva y se quite el seguro para volver a su Posición normal.

Nivel bajo de bolsas: Sensor utilizado para detectar la falta de bolsas y activar la señal luminosa.

Inicio y Final del conveyor: Sensores ópticos para detectar la presencia de cajas al principio y final del conveyor, respectivamente. Utilizados para detener le proceso cuando el conveyor esta repleto de cajas.

Caja Prensada: Sensor utilizado para detectar cuando una caja no salio completamente de la máquina, lo cual provoca un estancamiento del conjunto dobla bolsa y por ende un problema en el proceso.

Salidas

Dobla Bolsa: Señal de activación de la electroválvula que controla el movimiento y posición del brazo que dobla la bolsa.

Sujeta Bolsa: Señal de activación de la electroválvula que controla el movimiento y posición del brazo que sujeta la bolsa.

Abre Bolsa: Señal de activación de la electroválvula que controla el movimiento y posición del brazo que abre la bolsa.

Venturis Abre Bolsa: Señal de activación de la electroválvula que alimenta la bomba de vacío para abrir la bolsa.

Centra Bolsa: Señal de activación de la electroválvula que controla el movimiento y posición del brazo que centra la bolsa.

Venturis Recoge Bolsa: Señal de activación de la electroválvula que alimenta la bomba de vacío para recoger la bolsa.

Recoge Bolsa: Señal de activación de la electroválvula que controla el movimiento y posición del brazo que recoge la bolsa.

Motor Banda Transportadora: Señal de activación para el arranque del motor de la banda transportadora, en un movimiento hacia delante.

Parada de las cajas: Señal de activación de la electroválvula que controla los pistones utilizados para detener las cajas .

Sujeta Caja: Señal de activación de la electroválvula que controla el pistón utilizado para sujetar la caja mientras se realiza el proceso de inserción de la bolsa.

Parada del mandril: Señal para el frenado del motor que controla el movimiento del brazo que inserta la bolsa.

Mandril Forward (Hacia Abajo): Señal para el arranque del motor que controla el movimiento del brazo que inserta la bolsa, con un movimiento hacia abajo para insertar la bolsa.

Mandril Reverse (Hacia Arriba): Señal para el arranque del motor que controla el movimiento del brazo que inserta la bolsa, con un movimiento hacia arriba para devolver el brazo a su posición superior.

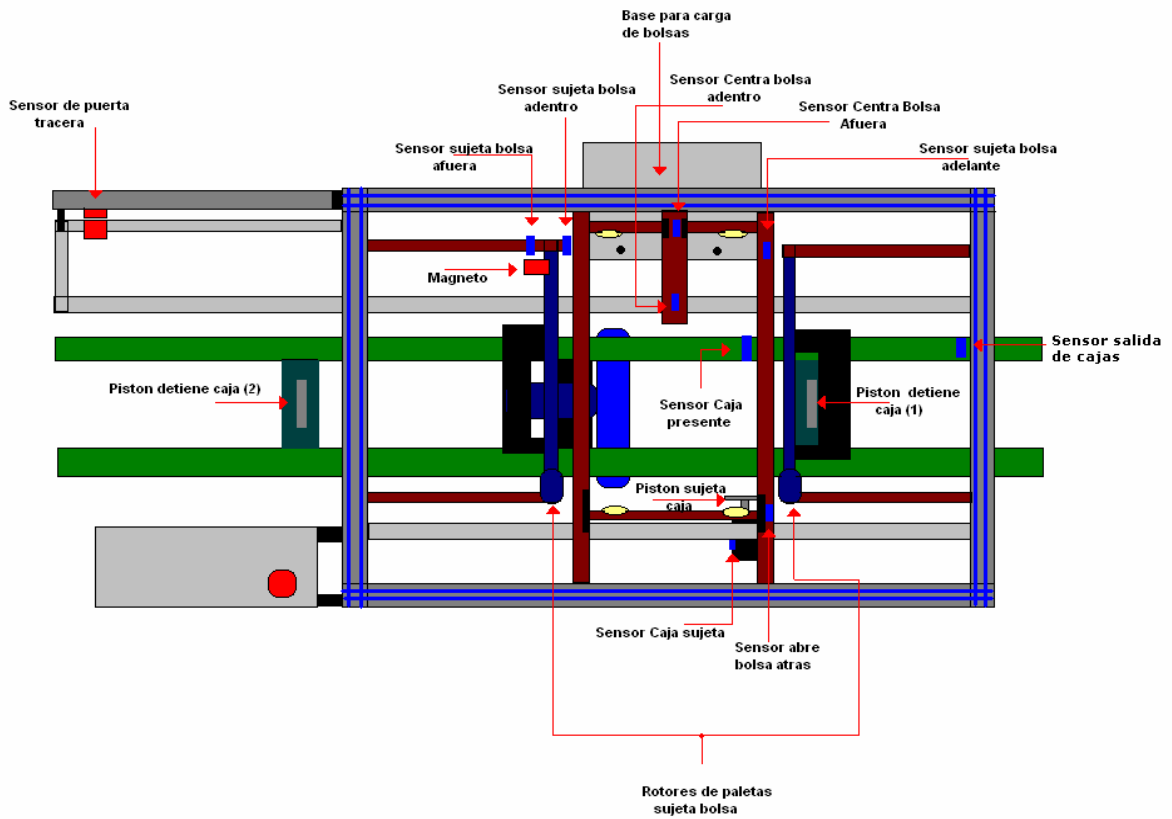
Señal Luminosa: Señal de activación de la luz que indica la falta de bolsas.

Anexo 5. Reporte de fallas en la máquina insertadora de bolsas referente al mes de noviembre del 2006.

| SEGUIMIENTO OPERACION BI-100 | | |
|------------------------------|--|---|
| FECHA | EVENTO | ACCION |
| 15/11/2006 | Dejada en operación a las 21:00 horas | |
| 16/11/2006 | Sin novedad | |
| 17/11/2006 | Detención repentina por la noche (descenso mandril) | manuel - reset + start - sin complicaciones (5min.) |
| 18/11/2006 | Sin novedad-Operación Normal | |
| 19/11/2006 | Sin novedad-Operación Normal | |
| 20/11/2006 | Detención repentina por la tarde (recogiendo bolsa) | Fernando - reset + start + sin complicaciones (2min.) |
| 21/11/2006 | 1a. detención mandril posición inferior (06:30). Por omisión deje una velocidad disponible mayor a 68hz. La máquina estaba con 71hz en el potenciómetro. 2a. Detención (13:00), caja prensada por carro "DoblaBolsa". | 1a.Fernando decido mantenerla detenida hasta mi llegada para evaluar causa. Corregi el parametro P035: 65Hz max. Cuando la velocidad se aumenta, también se tiene que aumentar el frenado, la distancia para frenar es constante. Acción: aliviar tension en faja dentada, liberar con variador a manua, tensar faja, subir mandril a posición de inicio, variador a automatico, RESET, START. 2a. Reset general de la maquina, puesta en operación por START. APC |
| 22/11/2006 | Detención (11:00), caja prensada por carro "DoblaBolsa". Operario retiró la caja sin RESET de la máquina. Al reiniciar la máquina carro "DoblaBolsa" no mantiene su posición inicial, baja sin acción del operario. | Reset general de la maquina, puesta en operación por START. Juan Carlos. NOTA: Se debe hacer la indicación a operarios que en caso de caja prensada por la máquina debe de ser retirada después de RESET de la máquina para evitar un posible accidente. En esa condición los pistones están cargados con toda la presión de alimentación y liberan su acción mecánica en un sólo instante. REVISION Fernando & J.C.: señal de sensores en acumulador de cajas. Revisar 3er sensor sobrante. |
| 23/11/2006 | Sin novedad, excepto se presento un evento en el que la máquina no respetó el acumulador lleno, igual que los dos días anteriores. Se dio reset + start y opero sin complicaciones. | Se programó visita para depurar el programa, eliminar sensor sobrante, lógica de sensores en acumulador de cajas. En la revisión del panel, se encontraron falsos contactos en las regletas de conexión. Se revisaron todas en general, incluyendo el I12 e I11 correspondientes a los sensores del mandril. |
| 24/11/2006 | Detención cerca de las 21:00hrs, mandril en posición inferior. | En la revisión se determinó que el sensor de detección del mandril en posición inferior falló, permaneció cerrado causando la falla. Se substituyó por un sensor nuevo. Se dejó el defectuoso en oficina de Fernando Sánchez. |
| 25/11/2006 | Sin novedad-Operación Normal | |
| 26/11/2006 | Sin novedad-Operación Normal | |
| 27/11/2006 | Detención del BI-100, en posición superior | No se determino causa alguna, ni quien ni como la puso en marcha personal de ALCOA. Al llegar la máquina estaba en operación. Se decidió revisar también contactos eléctricos del PLC como labor de mantenimiento que debería dársele a las máquinas por parte de ALCOA. Esto mientras se monitoreaba al operación del la misma. |
| 28/11/2006 | Sin novedad-Operación Normal | |
| 29/11/2006 | Sin novedad-Operación Normal | |
| 30/11/2006 | Sin novedad-Operación Normal | |

Anexo 6. Bosquejos de la máquina insertadora de bolsas.

Vista superior (sin el mandril)



Vista trasera

