

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



“Sistema de control automático de posicionamiento y accionamiento de pistones hidráulicos para máquina troqueladora en la empresa EUROMOBILIA S.A.”

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

Ariel Elizondo Torres

Cartago, Mayo de 2009

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
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. Arnaldo Rojas Coto

Profesor lector



Ing. Juan Carlos Jiménez Robles

Profesor asesor

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, 15 de mayo de 2009

Declaratoria de Autenticidad

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, 15 de mayo de 2009.



Ariel Elizondo Torres
Céd: 1-1160-0391

Resumen

El sector de la industria metal-mecánica es hoy en día uno de los principales campos de la actividad industrial en todo el mundo, involucrando tanto la actividad en si, como muchos otros sectores que se abastecen de estructuras metálicas para su desarrollo como la empresa EUROMOBILIA S.A., lugar en donde se desarrolló el presente proyecto.

Los avances científicos y tecnológicos han proliferado en torno a este campo, y han cambiado de manera positiva la forma en que trabaja ahora la industria de transformación del metal. Mejores herramientas, procesos de manufactura y diseño ingenieril han permitido un desarrollo más eficiente de la producción en este sector.

El desarrollo del proyecto dio como resultado la automatización de la sección de troquelado de una de las líneas de producción de rieles de hierro, la cual se encontraba en desuso por que no tenía ningún sistema de control electrónico que la gobernara.

Como solución se implementó un controlador lógico programable o PLC capaz de controlar la posición de los agujeros –con un error no mayor a 5mm– en una lámina en dos dimensiones y el corte de ésta con base en su medida específica, comunicándose para este fin con dos tipos distintos de servocontroladores que a su vez gobiernan dos servomotores. Para el troquelado se sintonizó un algoritmo PID que va a permitir que el golpe del troquel sea controlado, lo cual va a aumentar la vida útil de la herramienta; para esto se obtuvo el modelo matemático de la planta y se diseñó un programa que, utilizando entradas y salidas analógicas, va a controlar la velocidad del pistón hidráulico que acciona el troquel.

Parte de la solución fue el diseño de una interfaz gráfica que permitiera, de manera amigable, al usuario comunicarse con la maquina (HMI). Esta interfaz se implementó con una pantalla táctil que va a permitir comandar el sistema, programar recetas de troquelado, editar parámetros, ver el comportamiento en tiempo real de la máquina, observar mensajes, programar contraseñas, entre otras funciones.

Palabras claves: Automatización; Troquelado; Servomotor; Industria metalmeccánica; Modelo del sistema; PLC; PID; HMI.

Abstract

The metal-mechanical industry sector is one of the main fields of industrial activity in the world nowadays, involving the activity itself as much as some others sectors which obtain mechanical structures for their development like the company EUROMOBILIA S.A., place where this project was developed.

The scientific and technological advances have proliferated in this field, and have changed in a positive way the way the industry of metal transformation works now. Better tools, manufacture processes and engineering designs have allowed a more efficient development of this sector of production.

The development of this project made possible the automation of the die cutting process section of one of the iron rails production lines, which was not in use because the machine didn't have any electronic control system to put it to work.

As a solution, it was implemented a programmable logic controller (PLC) capable of control the position of the holes –with an error not greater than 5mm– in an iron sheet in two dimensions and the cutting of this one based on a specific measure, for this purpose the controller has to communicate with two different types of servo drives which, as the same time, control two servomotors. For the die cutting process it was tuned a PID algorithm which is going to allow a controlled punch, so this will enlarge the tool's lifespan; it was necessary to obtain the mathematical model of the system and it was designed a program to control the velocity of an hydraulic piston making use of analogical input and output modules.

Part of the solution was the design of a graphic interface which will make possible, in a friendly manner, the user to communicate with the machine (HMI). This interface was implemented with a touch screen which is going to allow commanding the machine, program die cutting recipes, edit parameters, to see in real time the machine behavior, watch messages, program passwords, and more.

Key words: Automation; Die cutting; Servomotor; Metal mechanical industry; System model; PLC; PID; HMI.

Dedicatoria

A Jesucristo:

*Señor altísimo, creador de todo lo que nos rodea
Quien ha guiado mis pasos, abierto puertas,
Quien me ha dado la fortaleza para seguir adelante
y me ha dado el privilegio de llegar hasta donde hoy estoy.*

A mis padres:

*Marco A. Elizondo Morera y Gemma Torres Ruiz
quienes siempre creyeron en mí y me apoyaron incondicionalmente;
sin ustedes esto no sería posible.*

Agradecimiento

Agradezco muy especialmente a Carlos Fco. Elizondo, por haberme apoyado incondicionalmente todo este tiempo.

A Jenny Barahona y Marvin Torres por haberme brindado su ayuda y nunca haber dicho “no”.

A mis hermanos que siempre estuvieron a mi lado.

A Raúl Álvarez por darme la oportunidad de completar un ciclo de mi vida y por darme las facilidades para lograrlo.

A mis amigos y compañeros de carrera quienes me brindaron su ayuda en momentos difíciles.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución	1
1.2 Solución seleccionada	2
Capítulo 2: Meta y objetivos	4
2.1 Meta	4
2.2 Objetivo general	4
2.3 Objetivos específicos	4
2.3.1 Objetivos de hardware	4
2.3.2 Objetivos de software	4
2.3.3 Objetivos de implementación	5
2.3.4 Objetivos de documentación	5
Capítulo 3: Marco teórico	6
3.1 Descripción del sistema o proceso a manejar	6
3.2 Antecedentes bibliográficos	13
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema	14
Capítulo 4: Procedimiento metodológico	22
4.1 Reconocimiento y definición del problema	22
4.2 Obtención y análisis de la información	22
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	23
4.4 Implementación de la solución	23
4.5 Reevaluación y rediseño	24
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	26
5.1 Análisis de soluciones y selección final	26
5.1.1 Computadora e interfaz de control	26
5.1.2 Tarjeta basada en microcontrolador	27
5.1.3 PLC y botoneras	28
5.1.4 PLC y HMI	29
5.2 Descripción del hardware	29
5.2.1 PLC	30
5.2.2 Interfaz RS-232	32
5.2.3 Módulos analógicos	35
5.2.4 Módulos digitales	39
5.2.5 Alimentación	43
5.2.6 HMI	45
5.2.7 Servocontroladores	46
5.2.8 Servomotores	49
5.2.9 Interruptores de límite	49
5.2.10 Sensores de posición LVDT	50
5.2.11 Electroválvulas proporcionales	51
5.2.12 Electroválvulas de dos estados	52
5.2.13 Control de paro de emergencia	52
5.3 Descripción del software	54
5.3.1 Modulo de comunicaciones 1746-BAS	54
5.3.2 PLC	58

5.3.3 HMI	70
Capítulo 6: Análisis de Resultados.....	76
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	88
7.1 Conclusiones	88
7.2 Recomendaciones	89
Bibliografía	90
Apéndices	92
A.1 Glosario, abreviaturas y simbología	92
A.2 Manual de usuario.....	95
A.3 Protocolos de medición.....	99
Anexos	101
Anexo B1: Especificaciones eléctricas del PLC SLC5/04.....	101
Anexo B2: Especificaciones del HMI 520M-006.....	102
Anexo B3: Especificaciones eléctricas del servocontrolador Indramat ECODrive03 DKC11.3-100-7-FW.....	103
Anexo B4: Especificaciones eléctricas del servocontrolador Aerotech BA Intellidrive. BAI20.....	104
Anexo B5: Especificaciones eléctricas de la electroválvula proporcional MOOG-D661-1962E	105
Anexo B6: Especificaciones eléctricas del transductor Balluff BTL5-A21-MM0050-B-532.....	106
Anexo B7: Dibujos de la máquina troqueladora.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Etapas de fabricación de rieles de metal.	1
Figura 1.2	Diagrama de bloques descriptivo del sistema de control seleccionado.3	
Figura 3.1	Diagrama de flujo del proceso de fabricación de rieles de metal.	6
Figura 3.2	Carruchas (bobinas) para la fabricación de rieles.	7
Figura 3.3	Aparejo desbobinador de carruchas de chapa de hierro.	8
Figura 3.4	Esquema básico de un troquel [16].	8
Figura 3.5	Esquema de la máquina troqueladora.	9
Figura 3.6	Máquina troqueladora.	10
Figura 3.7	Diagrama de flujo del proceso de troquelado.	11
Figura 3.8	Control de velocidad para accionamiento de pistones.	12
Figura 3.9	Ejemplo de formado de rieles de metal.	13
Figura 3.10	Respuesta de la planta (pistón P8) ante una entrada tipo escalón. ...	16
Figura 3.11	Diagrama de bloques para la validación del modelo de la planta.	17
Figura 3.12	Respuesta del modelo de la planta ante una entrada tipo escalón de - 0.5V. Simulación utilizando Simulink.	18
Figura 3.13	Diagrama bloques del sistema de control de posición para el proceso de perforación de chapa.	19
Figura 3.14	Simulación de la respuesta al escalón unitario de la planta con controlador de posición.	21
Figura 5.1	Diagrama de bloques detallado de la solución.	30
Figura 5.2	Módulo 1746-BAS con la puerta abierta [14].	33
Figura 5.3	Conexión del controlador Rexroth Indramat ECODRIVE03 puerto X2 con dispositivo de control: PC o PLC [12].	33
Figura 5.4	Conexión Daisy Chain para comunicación RS-232 del controlador Aerotech BA Intellidrive con dispositivo de control: PC o PLC. [1].	34
Figura 5.5	Conexión al módulo de entradas analógicas 1746-NI16V recomendada por el fabricante [14].	37
Figura 5.6	Conexión del módulo de salidas analógicas. 1746-NO4V recomendado por el fabricante [14].	39
Figura 5.7	Conexión de servocontroladores BA Intellidrive al PLC, señales de servomotores en posición y servomotores OK.	40
Figura 5.8	Conexión de entradas digitales al módulo 1746-IB16, recomendada por el fabricante [14].	41
Figura 5.9	Conexión de las entradas digitales al módulo 1746-IB16.	42
Figura 5.10	Conexión de las salidas de relés al módulo 1746-OW16, recomendada por el fabricante [14].	42
Figura 5.11	Conexión de las salidas de contacto al módulo 1746-OW16.	43
Figura 5.12	Circuito de alimentación del sistema.	44
Figura 5.13	Interfaz Hombre Máquina (HMI) implementada.	45
Figura 5.14	Controladores de servomotor utilizados.	46
Figura 5.15	Diagrama eléctrico de conexiones del controlador Rexroth Indramat Ecodrive03.	47
Figura 5.16	Diagrama eléctrico de conexiones del controlador BA Intellidrive.	48
Figura 5.17	Servomotores utilizados.	49
Figura 5.18	Conexión de transductores de posición lineal.	50
Figura 5.19	Electroválvula proporcional utilizada [13].	51

Figura 5.20 Conexión de electroválvulas proporcionales.....	52
Figura 5.21 Diagrama de bloques del dispositivo supervisor de paros de emergencia PNOZ X3.....	53
Figura 5.22 Diagrama eléctrico de conexión del dispositivo supervisor de paros de emergencia.....	54
Figura 5.23 Terminal para manejo de puertos RS-232 y parte del programa de configuración para el módulo 1746-BAS.....	55
Figura 5.24 Transferencia de archivos entre el PLC y tablas de datos imagen M0 y M1.....	56
Figura 5.25 Algoritmo de transmisión de datos serie por los puertos del módulo 1746-BAS.....	57
Figura 5.26 Algoritmo de recepción de datos serie por los puertos del módulo 1746-BAS.....	58
Figura 5.27 Trama de datos para el envío de comandos a los servocontroladores. A) Controlador BAI, B) Controlador INDRAMAT.....	59
Figura 5.28 Algoritmo de envío de comandos a los servocontroladores.....	61
Figura 5.29 Palabra de configuración del módulo de entradas analógicas [14]...64	64
Figura 5.30 Algoritmo de control de golpe de troqueles.....	65
Figura 5.31 Organización de recetas en el archivo de datos del PLC.....	66
Figura 5.32 Diagrama de bloques de software de la organización de recetas en el sistema.....	67
Figura 5.33 Diagrama de flujo del algoritmo encargado de correr recetas.....	68
Figura 5.34 Pantalla del HMI para control de contraseñas.....	71
Figura 5.35 Pantalla del HMI para diagnóstico de la máquina.....	72
Figura 5.36 Pantalla del HMI para control de contraseñas, contraseña incorrecta.....	72
Figura 5.37 Pantalla del HMI, menú de troquelado.....	73
Figura 5.38 Pantalla del HMI, programación de recetas.....	74
Figura 5.39 Pantalla del HMI, proceso de troquelado.....	75
Figura 6.1 Pruebas de comunicación del módulo 1746-BAS hechas con el PLC.....	79
Figura 6.2 Prueba de posicionamiento de un pistón de la máquina a 25mm sin control PID; respuesta ~ 2s, error de 0.71mm.....	82
Figura 6.3 Prueba de posicionamiento de un pistón de la máquina a 25mm sin control PID; respuesta < 1s, error de 8.84mm.....	83
Figura 6.4 Prueba de posicionamiento de un pistón de la máquina a 25mm con control PID; respuesta < 1s, error de 8.84mm.....	84
Figura 6.5 Prueba de accionamiento del golpe controlado del troquel montado en el pistón P8 de la máquina; Z1=25mm, Z2=30mm, V ~ 1mm/s.....	84
Figura 6.6 Fotografía tomada a la lámina perforada en la prueba realizada.....	85
Figura 6.7 Pantalla tomada en la prueba de error de servocontrolador Indramat, simulación online.....	86
Figura 6.8 Pantalla tomada en la prueba de error en controladores BAI, simulación online.....	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Datos medidos de la relación lineal-rotacional para cada servomotor, factor de escala calculado y carrera máxima.	15
Tabla 5.1 Configuración de módulos y PLC chasis 1.....	31
Tabla 5.2 Configuración de módulos y PLC chasis 2.....	32
Tabla 5.3 Conexión del módulo de entradas analógicas del PLC.....	36
Tabla 5.4 Conexión del módulo 3 del PLC, salidas analógicas.....	38
Tabla 5.5 Conexión del módulo 4 del PLC, salidas analógicas.....	38
Tabla 5.6 Conexión del módulo 5 del PLC, salidas analógicas.....	38
Tabla 5.7 Ejemplo de algunos comandos de control utilizados.....	60
Tabla 6.1 Equipo electrónico a controlar por el sistema implementado	76
Tabla 6.2 Equipo electrónico adquirido y existente para el proyecto	77
Tabla 6.3 Consumo de corriente de módulos en chasis 1	78
Tabla 6.4 Consumo de corriente de módulos en chasis 2	78
Tabla 6.5 Pruebas de desplazamiento de servomotores en la dirección de y	80
Tabla 6.5 Pruebas de desplazamiento de servomotores en la dirección de y (continuación).....	81
Tabla 6.6 Pruebas de desplazamiento de la lámina en la dirección de x.....	81
Tabla 6.7 Receta de troquelado probada en la máquina	85

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se describe el problema por el cual la empresa decide que este proyecto se lleve a cabo, se explica además los requerimientos del proyecto y se expone brevemente la forma en que se decidió darle solución.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

La empresa EUROMOBILIA S.A. se dedica a la fabricación y venta de distintos tipos de muebles para el hogar y oficina, entre los que destacan sillería, escritorios, muebles para cocina, paneles para cubículos (fastwall), entre otros. La empresa cuenta en este momento con dos plantas de producción en el país que abastecen de equipo mobiliario a sus clientes.

Los productos fabricados en esta empresa usan como materia prima fundamental la madera y una variedad de piezas de metal, de las cuales muchas son compradas a distintos proveedores como producto terminado. Actualmente, la empresa con miras a la autonomía, adquirió una línea de producción que le permitirá fabricar las piezas de metal necesarias para la elaboración de sus productos, para así reducir costos de producción.

La línea de producción adquirida es encargada de la elaboración de rieles de metal. El proceso de fabricación empieza con la etapa de alimentación de material, la cual se encarga de desenrollar una lámina de metal (hierro 14 de 2mm de espesor), arrastrarla y darle avance para luego ser agujerada. La etapa siguiente es la de troquelado, en esta etapa se le hacen agujeros a la lámina y se corta, para que ésta luego pase a la etapa final que es donde se dobla y adquiere su forma como producto terminado. En la figura 1.1 se ilustran estas etapas.

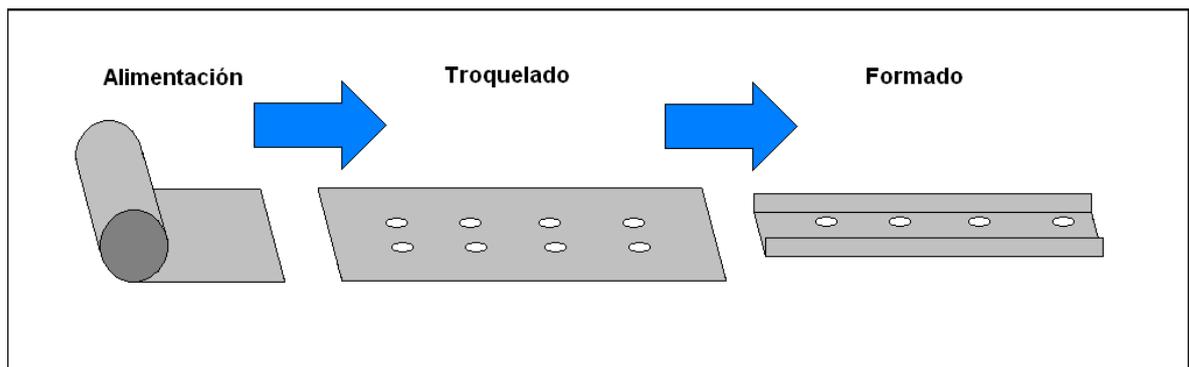


Figura 1.1 Etapas de fabricación de rieles de metal.

La línea de producción comprada por la empresa no está en funcionamiento por que no tiene control de ningún tipo. La mayoría de la maquinaria está completa, en buen estado e instalada, pero no existe ningún sistema que la controle para ponerla a funcionar. Junto con toda esta maquinaria adquirida, se encuentran varios tipos de motores y servomotores, pistones neumáticos e hidráulicos y otros

elementos; además existen varios dispositivos para control electrónico como: controladores de servomotores, electroválvulas, transductores de posición, algunos módulos para PLC, contactores, protecciones, entre otros.

La empresa DIGICONTROL S.A. es la encargada de diseñar e implementar un sistema de automatización y control para así hacer funcional la línea de producción mencionada. Es importante resaltar que el proyecto descrito en este informe abarca únicamente la automatización de la sección de troquelado de la línea de producción en cuestión. El proyecto general es propiedad de DIGICONTROL S.A. y se implementará en la planta de EUROMOBILIA S.A. ubicada en San Francisco de Dos Ríos.

La etapa de troquelado requiere el manejo de servomotores para el posicionamiento de cada agujero, además de un control automático del golpe de cada troquel en la lámina, una interfaz que permita al usuario programar distintas recetas y observar el funcionamiento en tiempo real de ésta. Así, el proyecto desarrollado contribuye con una de las partes de más importantes para el desarrollo posterior de la automatización de toda la línea de producción, lo cual es la meta primordial de este trabajo.

Al finalizar este proyecto la línea de producción de rieles de metal contará con una sección de troquelado que va permitir:

- a. Hacer agujeros en una lámina de hierro posicionados según indicación del usuario y realizar el corte de ésta con una guillotina accionada hidráulicamente.
- b. Mover manualmente cada uno de los servomotores de la máquina para permitir el posicionamiento de troqueles y el arrastre de la lámina.
- c. Programar diez distintas recetas para la ejecución automática del proceso de troquelado, y variar parámetros como la velocidad de perforación.

1.2 Solución seleccionada

El proyecto planteado por DIGICONTROL S.A. estipula que el sistema de control del proceso de troquelado cumpla con los siguientes requerimientos:

- a. El sistema de control debe ser capaz de comunicarse con los dos distintos tipos de controladores de servomotor que la línea de producción traía, para lograr un posicionamiento preciso (error no mayor a 5mm) de cada agujero.
- b. Debe de ser apto para correr un control automático para el accionamiento de pistones hidráulicos, utilizando para esto las electroválvulas proporcionales y transductores de posición existentes.
- c. Debe permitir la comunicación con los otros sectores de control del resto de la línea de producción o de lo contrario, ser completamente escalable y estar capacitado para añadir el control de éstos posteriormente.

- d. El sistema debe ser amigable con el usuario y permitir la programación de recetas para el proceso de troquelado, el uso de contraseñas, la variación de parámetros y control manual de dispositivos.

Con base en los requerimientos del proyecto, se decidió utilizar un Controlador Lógico Programable o PLC, además de una Interfaz Hombre Máquina o HMI basada en una pantalla táctil para el manejo de todas las funciones del sistema. La escogencia de este dispositivo radica en la robustez y estabilidad que debe tener el sistema (protecciones contra ruido electromagnético, vibraciones, entre otras) así como la característica fundamental deseada para el proyecto que implica un dispositivo programable y completamente escalable, con acople y ampliación de distintos módulos, además el dispositivo encargado de llevar a cabo la interfaz con el usuario (HMI) es también programable, así las demás secciones de la línea de producción que requieren control pueden ser operadas por algoritmos programados en el mismo PLC que utiliza la sección de troquelado utilizando el mismo HMI.

Se utilizó un chasis que permitiera el acople de distintos módulos. Módulos de entradas y salidas analógicas, y una alta capacidad de procesamiento matemático fueron tomados en cuenta para el PLC y seleccionados para la sintonización del sistema de control automático para los pistones hidráulicos requerido para el proyecto. Para comunicarse y comandar los controladores de servomotores, el sistema requirió de un módulo de comunicaciones serie con el estándar RS-232. Varios módulos de entradas digitales y salidas de contactos quedaron previstos para el manejo de las otras secciones de la línea de producción.

En la figura 1.2 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control seccionado para el proyecto.

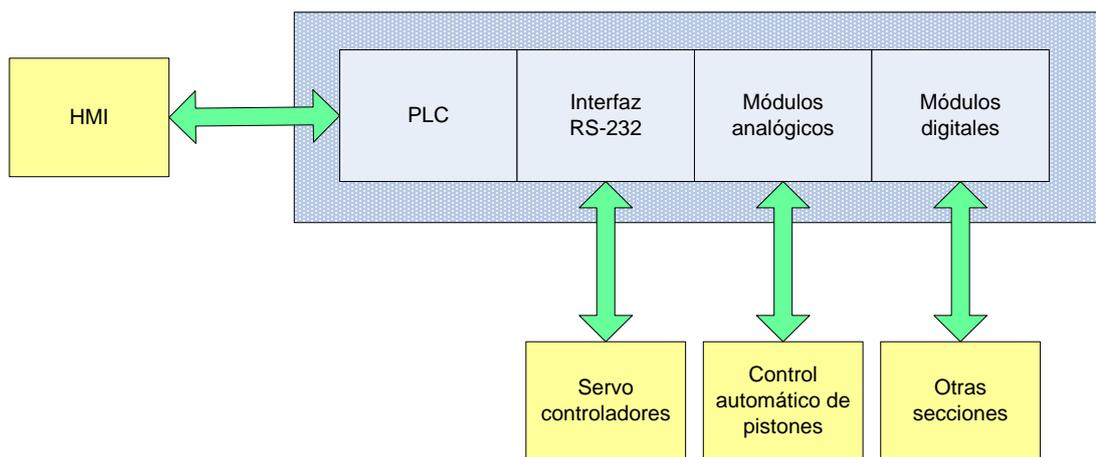


Figura 1.2 Diagrama de bloques descriptivo del sistema de control seccionado.

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

Poner en funcionamiento la máquina troqueladora de la línea de producción adquirida por la empresa EUROMOBILIA S.A. utilizando un sistema de control que esté capacitado para acoplarse a la futura automatización de toda la línea.

2.2 Objetivo general

Implementar en la máquina troqueladora de la línea de producción adquirida por la empresa EUROMOBILIA S.A., un sistema de control que automatice el proceso de troquelado para que los agujeros hechos en las láminas requeridas para la fabricación de rieles no tengan un error de posición mayor a 5mm.

2.3 Objetivos específicos

2.3.1 Objetivos de hardware

1. Seleccionar y adquirir un PLC que cumpla con los requerimientos del proyecto y que tenga facilidades para el control automático.
2. Adjuntar al dispositivo principal de control un módulo que permita la comunicación serie con el estándar RS-232, para el comando de controladores de servomotor.
3. Seleccionar y adquirir módulos de entradas y salidas analógicas para la lectura de datos de posición de transductores y el control de electroválvulas proporcionales.
4. Adquirir una Interfaz Hombre Máquina (MHI) que sea compatible con el dispositivo de control central y que permita controlar el sistema de una manera amigable con el usuario.

2.3.2 Objetivos de software

1. Configurar y programar, utilizando el lenguaje BASIC, el módulo de comunicación serial para que éste sea compatible con el protocolo de comunicación de los controladores de servomotores existentes.

2. Diseñar un algoritmo en lenguaje de escalera que permita enviar y recibir comandos vía comunicación serial RS-232 para el control del posicionamiento de los servomotores de la máquina.
3. Programar en un PLC un controlador PID que garantice una velocidad constante y regulada de un pistón hidráulico.
4. Generar un programa en lenguaje de escalera que siga una receta de troquelado programada por el usuario, que a su vez unifique el comando de servomotores y pistones hidráulicos.
5. Elaborar un software para HMI que permita, de manera gráfica, al usuario comandar manualmente la máquina, programar y correr recetas de troquelado, controlar el acceso al sistema utilizando contraseña y observar errores generales dados en servomotores.

2.3.3 Objetivos de implementación

1. Diseñar un panel de conexiones que contenga la totalidad de dispositivos electrónicos, eléctricos y de control que se necesitan para controlar la máquina troqueladora.
2. Medir la relación rotacional-lineal de cada servomotor y su sistema mecánico de traslación, para luego determinar un factor de escala y configurar los parámetros de los controladores de los servomotores.
3. Diseñar un controlador de posición para un pistón hidráulico de la máquina que garantice una velocidad de perforación constante, utilizando para esto un modelo matemático del elemento, obtenido a partir de la medición de la respuesta al escalón de éste.
4. Realizar pruebas de posicionamiento de servomotores, curva de velocidad de pistones y pruebas finales de funcionamiento de la máquina y el proceso automatizado.

2.3.4 Objetivos de documentación

1. Generar un manual de usuario del funcionamiento de la máquina.

Capítulo 3: Marco teórico

En este capítulo se explica el proceso de producción de rieles de metal que está asociado a la línea de producción de la cual este proyecto forma parte. Se destacan aspectos de la solución como el uso de tecnología de punta y se examinan aspectos físicos, matemáticos y electrónicos del sistema desarrollado.

3.1 Descripción del sistema o proceso a manejar

Se procedió a determinar la forma de operación de la línea de producción en cuestión, esto mediante entrevistas al ingeniero de planta y con base en observación de líneas de producción similares de la empresa. Así, se obtuvo la siguiente información:

El proceso de fabricación de rieles de hierro que utiliza la línea de producción de la cual este proyecto forma parte consta de tres etapas principales: desbobinado y alimentación de material, troquelado y cortado, y por último, el formado del material. En la figura 3.1 se puede observar un diagrama de flujo del proceso mencionado.

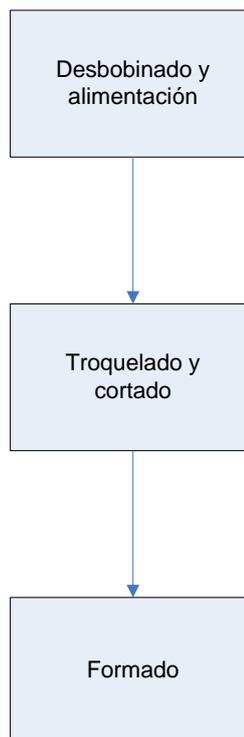


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de rieles de metal.

El primer paso del proceso se refiere al desarmado de las carruchas (bobinas), que es la presentación de la materia prima para la fabricación de los rieles. Se utiliza una lámina de hierro de 2mm de espesor para la fabricación de este producto. En la figura 3.2 se muestra una fotografía de las bobinas o carruchas utilizadas en este proceso.



Figura 3.2 Carruchas (bobinas) para la fabricación de rieles.
Lámina de hierro de 2mm de espesor.

Las carruchas son levantadas por un montacargas y colocadas en una estructura que se encarga de rotarlas para ir desarmándolas y extendiéndolas sobre una mesa, a este aparejo se le conoce como desbobinador, figura 3.3. Este proceso se hace con una carrucha a la vez conforme se valla necesitando más materia prima.

Con la carrucha desarmada, la lámina –también conocida como chapa– se dirige, a través de unos de rodillos que la desdoblan y aplanan, hacia la máquina troqueladora.

El proceso de troquelado es aquel en el que se hace uso de troqueles para la perforación por presión generalmente de láminas de metal, esto a temperatura ambiente (troquelado en frío). Un troquel es módulo mecánico que cuenta con un

componente hembra (matriz) y uno macho (punzón) los cuales trabajan en posiciones opuestas uno con el otro, la matriz permanece sujeta al banco de la máquina mientras al punzón se le aplica una fuerza para así cortar el material que se coloca en el medio y agujerarlo con la forma que tenga el troquel, como se puede observar en la figura 3.4 [16].



Figura 3.3 Aparejo desbobinador de carruchas de chapa de hierro.

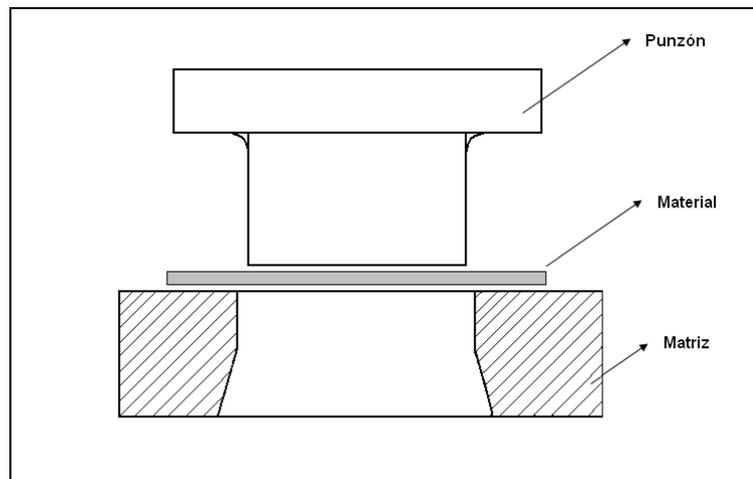


Figura 3.4 Esquema básico de un troquel [16].

En la figura 3.5 (y en el anexo B7) se presenta un esquema que ilustra los componentes principales de la máquina troqueladora. Esta máquina cuenta con un rodillo de arrastre (rodillo inferior en la figura 3.5) acoplado a un servomotor Rexroth INDRAMAT de 13.8KW (ilustrado como: MA), éste rodillo es el encargado de darle avance a la lámina de hierro y de medir la distancia en la dirección de x que esta debe recorrer para ser agujerada o cortada. El rodillo superior está acoplado a un pistón neumático que tiene la función de elevarlo o bajarlo, una distancia no mayor a 5 cm en dirección de z, para que así los dos rodillos presen la lámina y no la dejen resbalar. La máquina tiene además nueve pistones hidráulicos (P1 a P9) que accionan cada uno un troquel, estos troqueles tienen distintas formas y separaciones para el corte, ver Anexo B7. Cada uno de estos pistones está acoplado a una estructura que permite el movimiento de los troqueles en la dirección de y, utilizando para esto servomotores Aerotech BM 500 de 1.5KW (M5 a M13). El mismo tipo de motores se encuentra de M1 a M4 los cuales se encargan de mover las mesas guía de entrada y salida, que tienen la función de centrar y sujetar la lámina para minimizar el error en el troquelado en al dirección de y. Los troqueles se pueden mover únicamente en la dirección de y y z, el rodillo de arrastre es el que se encarga del posicionamiento en x. Por último, existe otro pistón hidráulico (PC) que acciona una guillotina para cortar la lámina. En la figura 3.6 se puede ver una fotografía de la máquina troqueladora.

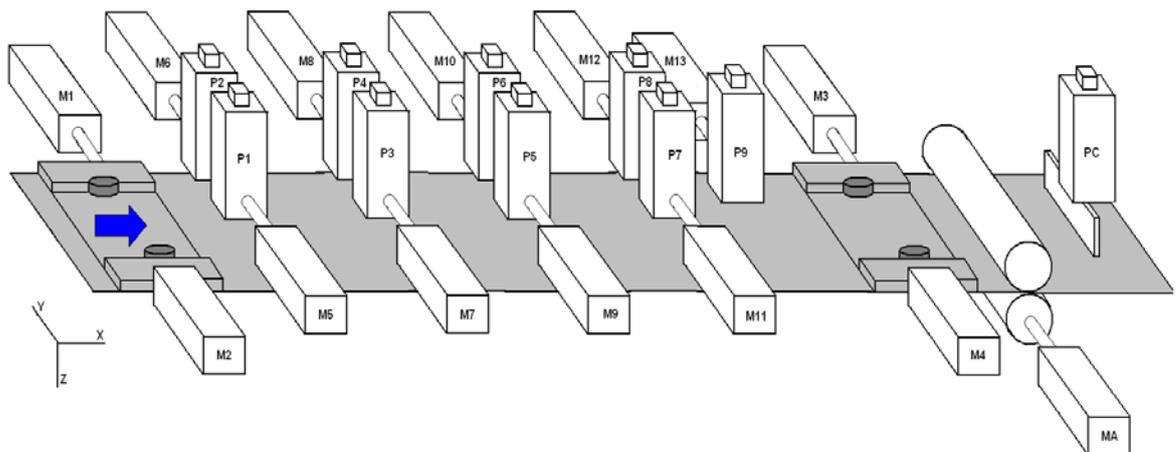


Figura 3.5 Esquema de la máquina troqueladora.
La flecha indica la dirección de movimiento de la chapa.

La máquina troqueladora funciona de la siguiente manera:

- Se parte del hecho que la máquina fue cargada previamente con materia prima. Para esto se debe asegurar que la lámina esté prensada por el rodillo de arrastre.
- Todos los pistones hidráulicos deben estar contraídos para permitir el paso de la chapa.
- Los servomotores para el movimiento en y deben estar calibrados, esto es, deben haber sido enviados a su posición cero o HOME, para que estos tengan su referencia establecida antes de empezar los desplazamientos. La

calibración es necesaria únicamente cuando se enciende la máquina y se realiza de manera asistida y guiada por el sistema de control.



Figura 3.6 Máquina troqueladora.
A la izquierda se observa la entrada de la chapa.

- d. Cumpliendo con estas condiciones, el sistema debe mover las mesas guía según indique la receta para poder continuar el proceso.
- e. Para empezar el ciclo, se realiza primero el movimiento en la dirección de y del troquel que se requiera en su posición específica.
- f. Luego se arrastra la lámina hasta la posición donde se requiera el primer agujero.
- g. Se verifica que ninguno de los motores esté en movimiento, y se procede a accionar el pistón que se requiera para hacer el primer agujero con el troquel seleccionado.
- h. Se retrae el pistón que hizo el agujero, y se repite el proceso: primero posicionamiento en y, luego en x, cuando ningún motor esté en movimiento se hace el agujero, y así sucesivamente.
- i. Cuando se requiera hacer un corte de la lámina, se acciona el pistón que tiene la guillotina y se retrae, para terminar de esta manera el troquelado y corte en un riel, y continuar con la producción.

En la figura 3.7 se puede ver el diagrama de flujo del proceso de troquelado descrito anteriormente.

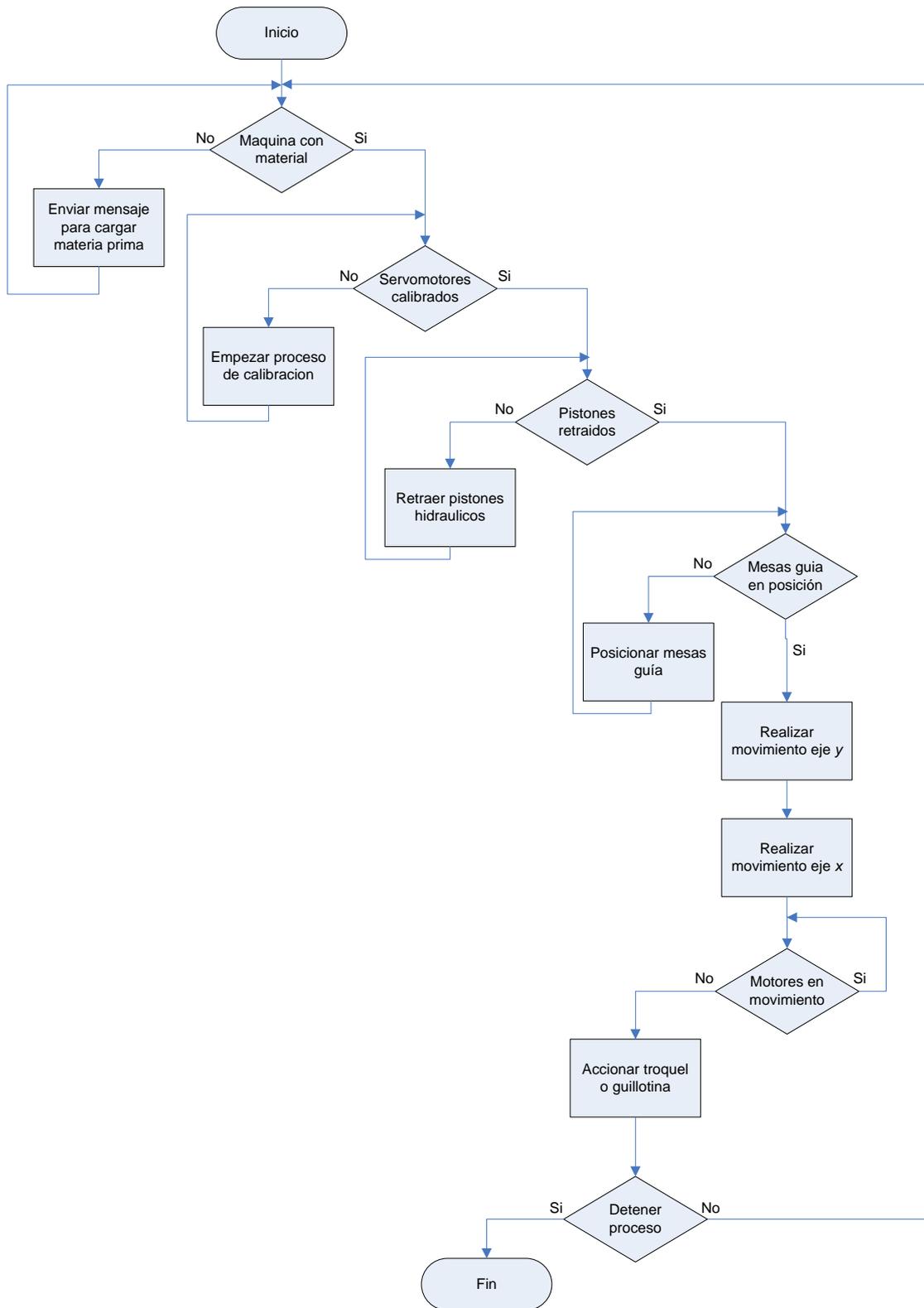


Figura 3.7 Diagrama de flujo del proceso de troquelado.

Además de la automatización de las funciones de posicionamiento de los troqueles en el eje y, y de arrastre de la lámina (eje x) que requiere la máquina, es necesario un sistema que controle la velocidad en que cada troquel se desplaza (en dirección de z). La velocidad con la que se hace el troquelado es un aspecto de suma importancia ya que ésta influye en el desgaste y la vida útil de la herramienta, por este motivo el “golpe” de cada troquel en la lámina debe ser regulado. Mediante entrevistas con el ingeniero de planta de la empresa se determinó el tipo de control que cada pistón debe tener para minimizar el desgaste o deterioro de los troqueles (en [15] se habla respecto al proceso de accionamiento hidráulico), este proceso se explica a continuación:

En la figura 3.8 se observa el control de velocidad que debe tener cada pistón del proceso de troquelado, cuando $Z = 0$ el pistón se encuentra totalmente contraído y el troquel se encuentra a la distancia de separación máxima con la chapa. La velocidad del troquel debe ser controlada para que éste se aproxime a la lámina a velocidad máxima (velocidad de aproximación) hasta llegar al punto Z1 que se ubica justo antes de que el troquel toque la lámina (a 1 o 2 milímetros de ésta aproximadamente), seguidamente, cuando se va a estampar la chapa la velocidad debe disminuir a un valor constante –ingresado por el usuario al sistema como un parámetro– para minimizar el desgaste del troquel (velocidad de perforación), para esto el sistema a desarrollar debe de monitorear la distancia de penetración del troquel en todo instante, la presión del pistón en este momento debe ser máxima [16]. En el momento en que el troquel llega a la posición Z2 se ha hecho el agujero y se debe retornar el vástago a velocidad máxima (velocidad de retroceso) para despegar la pieza de desecho que pudiese haber quedado pegada en el punzón y preparar la herramienta para su siguiente accionamiento. El hecho de que el acercamiento y retroceso del pistón se haga a velocidad máxima (o más alta que la de perforación) es requerido para maximizar la velocidad de producción de la máquina.

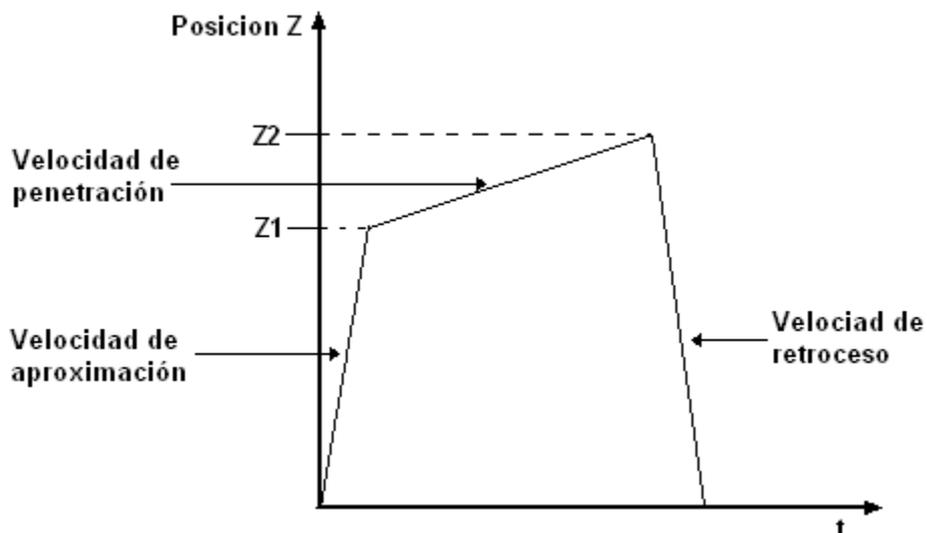


Figura 3.8 Control de velocidad para accionamiento de pistones.

Cuando la lámina ha sido troquelada y cortada en piezas de acuerdo a un diseño específico, éstas son llevadas por una banda transportadora desde la máquina troqueladora, hasta la sección de formado.

En la sección de formado, varios rodillos formadores van arrastrando y doblando estas piezas hasta darle la forma de riel, que es el producto terminado que produce esta línea y el que se va a obtener cuando se finalice la automatización de ésta, luego de que este proyecto sea completado. En la figura 3.9 se puede observar un ejemplo de cómo funciona la sección de formado y de cómo se ve un tipo de riel producido por la empresa.



Figura 3.9 Ejemplo de formado de rieles de metal.

3.2 Antecedentes bibliográficos

Los sistemas electrónicos en la actualidad han evolucionado para hacer de los procesos industriales además de un recurso lucrativo, todo un sistema inteligente con tecnología de punta. Características como flexibilidad y mayor capacidad en dispositivos, tecnologías que simplifican el tiempo de diseño y la utilización de sistemas en múltiples aplicaciones, han hecho de la automatización industrial y el control automático unos de los campos de mayor desarrollo actualmente.

El hecho de controlar un proceso industrial con un sistema que sea estable, robusto y flexible, al que se le puedan agregar distintos módulos conforme la aplicación así lo requiera, que se le pueda crear, editar y agregar secciones de código independientes para su programación en cualquier momento de la etapa de diseño o posterior a esta para su mantenimiento y que pueda controlar distintos procesos con un mismo hardware, garantizando así la escalabilidad de

un sistema de control, ha sido el aspecto relevante que los controladores PLC brindan y que éste proyecto requiere.

Aunque los PLC están en el mercado desde hace ya mucho tiempo, es importante observar las actualizaciones y mejoras en estos. Evoluciones en hardware como el alto nivel de procesamiento matemático, software optimizado para monitoreo en tiempo real de señales, instrucciones para control automático, manejo de archivos y palabras ASCII. Además de la compatibilidad con una gran variedad de sensores para uso industrial, interfaces gráficas para el control de procesos (HMI), opciones de comunicación como DH 485, DH+, DF1, RS-232, actualización a protocolo EtherNet para aplicaciones donde se requiere acceso por Internet para el monitoreo y disponibilidad de funciones del sistema alrededor del mundo, entre otras, son opciones que la solución de este proyecto tiene disponibles y lo ponen a la altura de la tecnología actual.

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema

Un objetivo específico de este proyecto es medir la relación rotacional-lineal de cada servomotor y su sistema mecánico de traslación, para luego determinar un factor de escala y configurar los parámetros de los controladores de los servomotores. Como se utilizan dos tipos distintos de servomotores (de M1 a M13 es de un tipo y MA es de otro tipo, ver figura 3.5), existen dos tipos de controladores diferentes para éstos.

Los motores BM500 de Aerotech (movimiento y de los troqueles y mesas guía) utilizan un controlador modelo BA Intellidrive, en el cual el parámetro PRM:200 Position Scale Factor se utiliza para convertir de unidades reales a conteos del encoder del motor. Para estos motores el encoder tiene una resolución de 16000 conteos por revolución, así, se debe de medir la distancia lineal recorrida por el troquel por revolución, para luego determinar un factor que permita convertir las distancias que ingresa el usuario en milímetros, por conteos que debe leer el encoder para posicionar el motor. Este factor se debe configurar en el parámetro PRM:200 de cada controlador. En la ecuación 3.1 se muestra el cálculo de este factor.

$$FE \left[\frac{mm}{conteo} \right] = X \left[\frac{mm}{rev} \right] * \frac{1}{16000} \left[\frac{rev}{conteo} \right] \quad (3.1)$$

Donde: X representa la relación lineal-rotacional medida en máquina, y FE es el factor de escala que se debe configurar en el controlador. El usuario ingresa el desplazamiento en milímetros, el controlador divide este valor entre FE y obtiene el número de conteos que necesita para llegar a la posición que el usuario indicó.

Se tomaron datos de la relación lineal-rotacional en la máquina y se hizo el cálculo del factor de escala para todos los servomotores. Esta información se resume en la tabla 3.1 haciendo uso de la simbología empleada en la figura 3.5.

Tabla 3.1 Datos medidos de la relación lineal-rotacional para cada servomotor, factor de escala calculado y carrera máxima.

Controlador de servomotor	Distancia recorrida por revolución (mm)	Factor de escala calculado (mm/cont)	Distancia máxima de carrera (mm)
M1	5	0.0003125	324
M2	5	0.0003125	323
M3	5	0.0003125	333
M4	5	0.0003125	340
M5	5	0.0003125	101
M6	20	0.0012500	156
M7	5	0.0003125	106
M8	20	0.0012500	172
M9	5	0.0003125	101
M10	5	0.0003125	166
M11	20	0.0012500	177
M12	20	0.0012500	175
M13	5	0.0003125	200

El motor Rexroth INDRAMAT dedicado al arrastre de la lámina (movimiento en x) utiliza un controlador modelo ECODRIVE3 al cual se debe configurar directamente la medición lineal rotacional ya que éste se encarga de la conversión de unidades a conteos internamente, el usuario le envía los comandos de desplazamiento en milímetros. Se midió la circunferencia del rodillo de arrastre la cual es de 505mm y se configuró en el controlador.

Otro objetivo importante del proyecto consistió en diseñar un bloque del sistema que fuera capaz de controlar el “golpe” del troquel en la chapa, como se explicó en la sección 3.1, para minimizar el desgaste de la herramienta. Para esto fue necesario obtener el modelo matemático del conjunto pistón-electroválvula-transductor, para lo cual se obtuvo empíricamente la respuesta al escalón de éste.

En la figura 3.10 se puede observar la medición hecha para obtener la respuesta de la planta ante una señal de excitación tipo escalón en lazo abierto. Esta forma de onda fue obtenida para el pistón P8 (ver figura 3.5) utilizando el software de diseño RSLogix 500.

El gráfico fue escalado según la capacidad de medición del transductor (de 0 a 50mm) y el escalón aplicado fue de -0.5V. En esta medición interesa únicamente la rampa ascendente de la figura 3.10 que es el accionamiento de repulsión del pistón hacia abajo, la rampa descendente no se tomó en cuenta para ningún análisis puesto que no se requiere ningún tipo de control en la retracción del pistón.

Se puede notar que el pistón tiene un comportamiento (al vacío) que evidencia una velocidad constante ante un caudal propiciado en la electroválvula por un

voltaje constante. También se notan los finales de la carrera del pistón los cuales se midieron de 9.85mm el mínimo (pistón totalmente contraído) y de 34.86mm el máximo, esa distancia fue recorrida en 16s en la prueba.

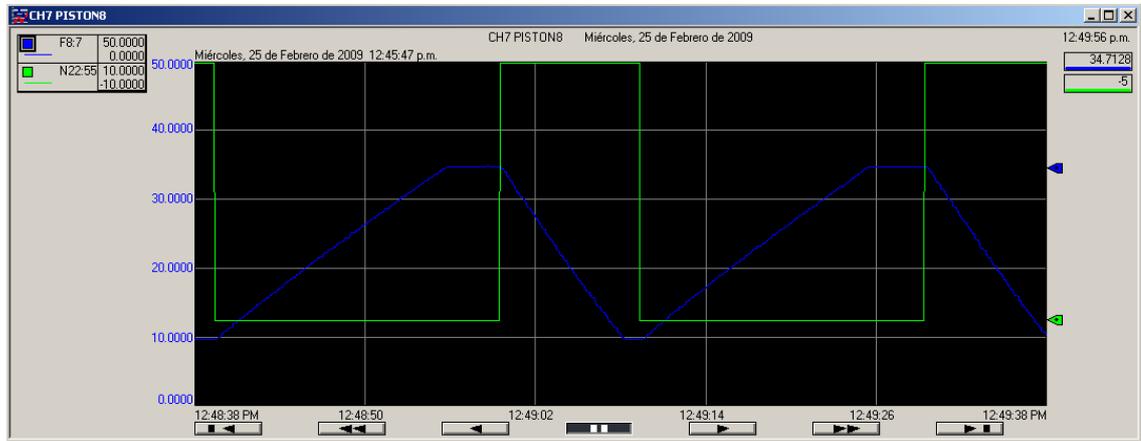


Figura 3.10 Respuesta de la planta (pistón P8) ante una entrada tipo escalón.

Se utilizó el criterio de diseño por método de respuesta ante escalón descrito en [8] y análisis gráfico para encontrar el modelo matemático y para diseñar el sistema de control automático. En éste se utiliza el modelo de retardo de primer orden con tiempo muerto como se muestra en la ecuación

$$G(s) = \frac{k \cdot e^{-st_d}}{(s + a)} \quad (3.2)$$

donde:

$G(s)$ es el modelo matemático de la planta en términos de la variable de frecuencia compleja s .

t_d es el tiempo de retardo de la señal con respecto a la entrada.

a es el recíproco de la constante de tiempo del sistema.

k es la ganancia estática del sistema.

El tiempo muerto del sistema es muy pequeño y despreciable en ésta aplicación, de hecho si se observa la figura 3.10 no se nota ningún comportamiento exponencial de la planta.

La constante de tiempo del sistema τ se identifica en un sistema de primer orden observando el tiempo en el cual la salida alcanza un 63.2% de la diferencia entre el valor final y el valor inicial, además se debe tomar en cuenta el tiempo al 39% como se observa en la ecuación 3.3. Es importante destacar en este punto que se está obteniendo un modelo de un sistema que es inestable y por lo tanto no llega a un valor final por acción natural de la planta, si no por los topes mecánicos propios del cilindro hidráulico, sin embargo la aproximación al sistema de primer

orden se puede utilizar tomando en cuenta que el tiempo de estabilización es infinito y por tanto la constante de tiempo $\tau = \infty$

$$\tau = 2(t_{63\%} - t_{39\%}) \quad (3.3)$$

así, la constante $a = \frac{1}{\infty} = 0$

finalmente, la constante estática k se obtiene al calcular la pendiente de la rampa que representa la velocidad del pistón entre la amplitud del escalón aplicado.

$$k = \frac{25.01mm}{-0.5V} \cdot \frac{1}{16s} = -3.125 \left[\frac{mm}{V \cdot s} \right] \quad (3.4)$$

El modelo matemático de la planta queda finalmente como se muestra en la ecuación 3.5.

$$G(s) = \frac{-3.125}{s} \left[\frac{mm}{V} \right] \quad (3.5)$$

Se puede observar que la planta se comporta de manera similar a un integrador, debido a que la posición aumenta linealmente con respecto al tiempo cuando se mantiene una señal de entrada constante, hasta que el pistón llega a los límites mecánicos del cilindro. Al aplicar un escalón de -0.5V se obtuvo una velocidad del pistón de 1.56mm/s.

Teniendo el modelo de la planta, se procedió a validarlo utilizando el software de Matlab Simulink, en el cual se aplicó un escalón de -0.5V al modelo de la planta calculado y se obtuvo la respuesta que se observa en la figura 3.12. En la figura 3.11 se puede observar el diagrama de bloques hecho en Simulink para la simulación.

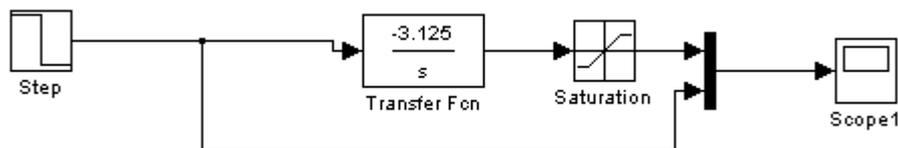


Figura 3.11 Diagrama de bloques para la validación del modelo de la planta.

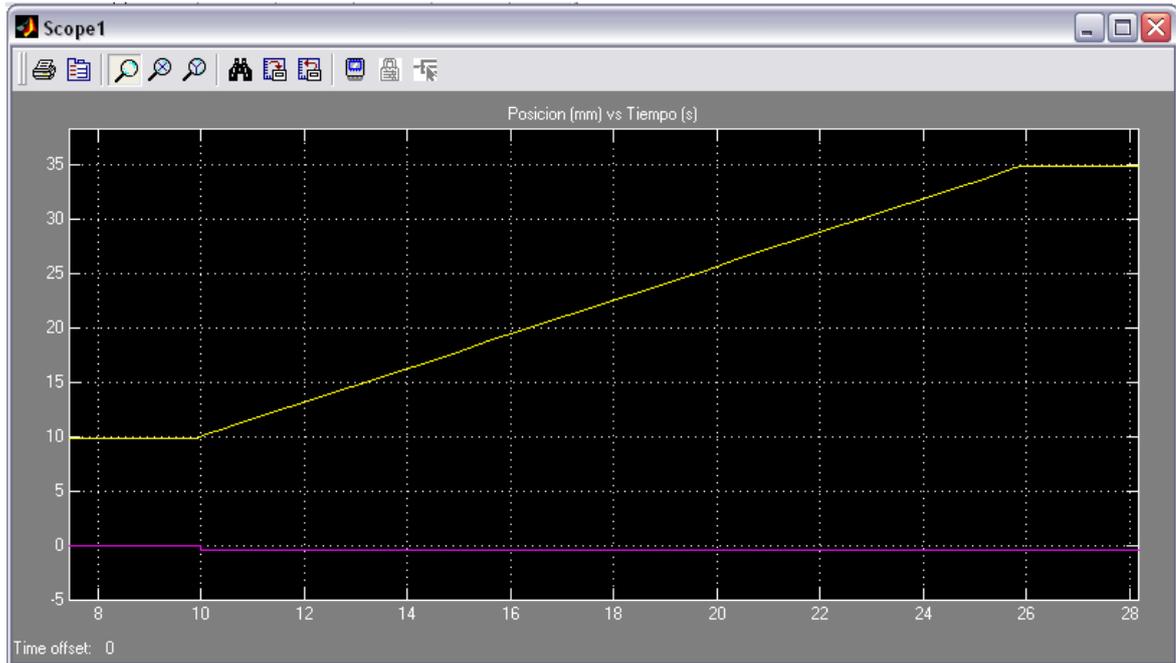


Figura 3.12 Respuesta del modelo de la planta ante una entrada tipo escalón de -0.5V. Simulación utilizando Simulink

En la figura 3.12 se puede ver el comportamiento simulado del modelo que se obtuvo anteriormente. El sistema responde con una velocidad constante ante una señal de entrada continua, se pueden notar los finales del pistón (que se incluyeron en la simulación) en 9.85 y 34.86mm, y que el tiempo que dura la rampa en llegar del extremo mínimo al máximo es de 16 s aproximadamente. De esta manera, se concluye que la ecuación 3.4 es un modelo fiel del comportamiento real de la planta, del cual se parte para el diseño del control automático del sistema que comanda el troquelado.

Para llegar a obtener un control del golpe del troquel como el que se explicó en la figura 3.8 es necesario diseñar un regulador que permita que el avance del pistón hasta Z1 sea controlado. De esta manera, el pistón debe desplazarse hasta Z1 lo más rápido posible con un sobreimpulso mínimo, a partir de este punto se le da al sistema un valor de voltaje a la entrada para que se realice el proceso de perforación con una velocidad constante, y por último cuando se ha alcanzado el punto Z2 se da un valor de voltaje que retraiga el pistón hasta su punto de origen. Es importante que el desplazamiento de avance del pistón hasta Z1 sea controlado, ya que si existiera un sobreimpulso muy grande el troquel chocaría contra la lámina produciendo un desgaste y posible daño en la herramienta. Cabe resaltar que el punto Z2 se encuentra a una distancia de uno o dos milímetros después de hacer el agujero, es recomendable en este proceso evitar los choques en los extremos del pistón para aumentar la vida útil de este.

Se procedió a diseñar un controlador de posición del troquel en el proceso de aproximación a la lámina. Así, el punto Z1 se ajusta en el control como el valor de

la consigna. En la figura 3.13 se expone el diagrama de bloques del sistema de control de posición.

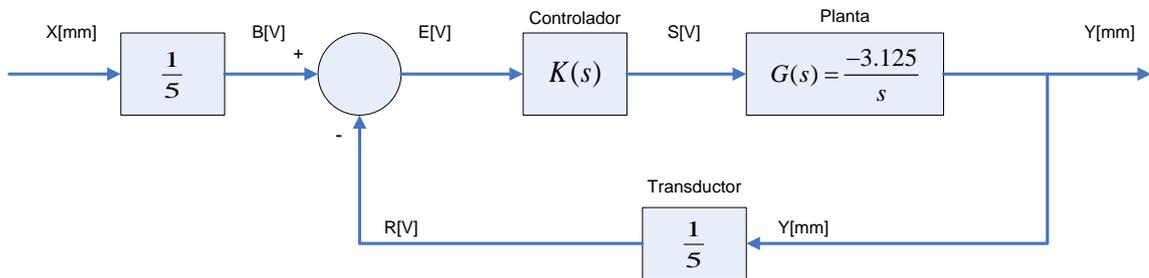


Figura 3.13 Diagrama bloques del sistema de control de posición para el proceso de perforación de chapa.

La señal X en milímetros es el valor de consigna y se ajusta al valor de la distancia Z1, esta distancia es transferida a voltios por medio de la constante de proporcionalidad que es la misma que la del transductor. La señal E, es el error que hay entre la consigna B y el dato de realimentación R dado por el sensor. Así, la señal de error llega al controlador el cual actuará de la mejor forma para darle un voltaje al actuador (electroválvula proporcional) el cual llega a variar la posición final del pistón.

A continuación se muestran los resultados del diseño del controlador K(s) calculado por el método de la bisectriz explicado en [11]. El controlador se diseñó para que tuviera un sobreimpulso máximo de 3% y un tiempo de estabilización al 2% de un segundo.

Se calculó el punto s_1 utilizando las especificaciones dinámicas

$$M = e^{-\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} = 0.03 \Rightarrow \zeta = 0.745$$

$$t_{s2\%} = \frac{4}{\zeta\omega_n} = 1 \Rightarrow \omega_n = 5.37$$

$$s_1 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} = -4.00 + 3.58i$$

donde la contribución angular del compensador es:

$$\varphi_{po} = \pm 180 + \angle \widehat{G}_0(s) \Big|_{s=s_1} = 41.8578^\circ$$

luego,

$$p_0 = -|s_1| \frac{\cos\left(\frac{\theta - \phi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta + \phi}{2}\right)} = -7.21$$

$$s_0 = -|s_1| \frac{\cos\left(\frac{\theta + \phi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\theta - \phi}{2}\right)} = -4$$

$$\hat{K}_{lead} = \left(\frac{s - s_0}{s - p_0} \right) = \frac{s + 4}{s + 7.21}$$

$$k_c = \frac{1}{\left| \hat{K}_{lead} G_O(s) \right|_{s=s_1}} = 2.3074$$

el controlador de adelanto resulta:

$$\boxed{K_{lead} = 2.3074 \left(\frac{s + 4}{s + 7.21} \right)} \quad (3.6)$$

se evalúa un periodo de muestreo

$$t_{s2\%} = 5\tau = 1 \quad T \leq \frac{\tau}{10} \leq 20ms$$

se escogió un periodo de muestreo de 20 ms

para realizar la discretización se utilizó el método del retenedor de orden cero

así,

$$\boxed{K_{zOH}(z) = \frac{2.3074(z - 0.9255)}{z - 0.8657} = \frac{Y(z)}{E(z)}}$$

y la ecuación de diferencias resulta:

$$\boxed{y(kT) = 2.3074 * e(kT) - 2.1355 * e(kT - 1) + 0.8657 * y(kT - 1)} \quad (3.7)$$

En la figura 3.14 se observa el resultado de la simulación en Matlab al agregar el compensador diseñado a la planta, esta figura representa la respuesta al impulso unitario en donde se observa que no hay sobreimpulso y el sistema llega a alcanzar la estabilidad en aproximadamente 1.5 s.

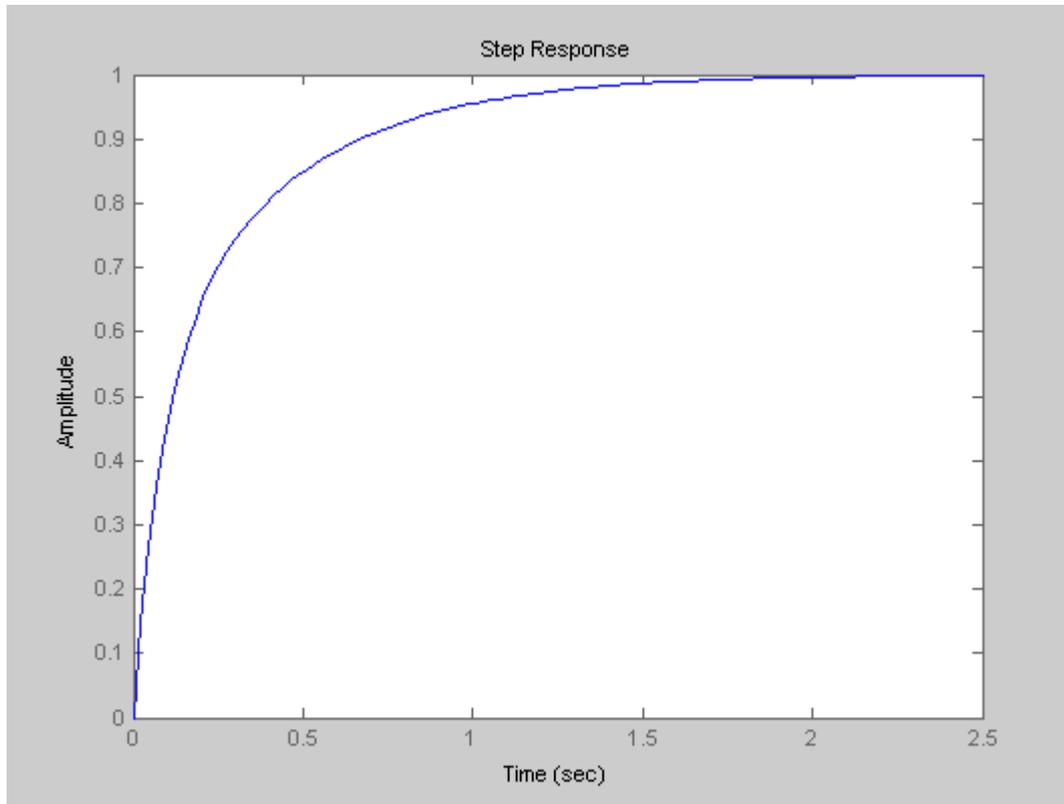


Figura 3.14 Simulación de la respuesta al escalón unitario de la planta con controlador de posición.

Teniendo la ecuación de diferencias 3.7, los parámetros KP, KD y KI (en ese orden en la ecuación) se ajustan en un bloque PID en la programación del PLC.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En esta sección se da a conocer la forma en la que se obtuvo y se analizó la información que permitió identificar el problema existente en la empresa, la forma en que se analizaron varias opciones de solución y los criterios estudiados para seleccionar la más conveniente para la aplicación. Además, se exponen varias mejoras que se pueden implementar al sistema en etapas futuras.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

En esta etapa, el reconocimiento del problema fue evidente: la máquina troqueladora, así como el resto de la línea de producción adquirida, no estaba en funcionamiento. Sin embargo, fue necesario visitar la planta en varias ocasiones, examinar el funcionamiento mecánico de la máquina, estudiar los dibujos y manuales de ésta, tomar datos de todos los dispositivos electrónicos y de control con los que se contaba, observar el funcionamiento de máquinas similares y realizar entrevistas al ingeniero de planta de la empresa para establecer un plan para el desarrollo del proyecto y la meta que éste debía alcanzar.

De esta información, se estableció que el proyecto debía tener dos características importantes: primero, debía ser compatible y capaz de comandar el equipo electrónico existente, a saber: electroválvulas proporcionales y transductores de posición, dos tipos distintos de controladores de servomotor y electroválvulas con señales abierto-cerrado principalmente; la otra característica importante es que el sistema debe de estar previsto y estar basado en un sistema modular para el control del resto de la línea de producción.

Teniendo esto en mente, se logró elegir entre distintas soluciones y escoger la mejor alternativa. Se tomó en cuenta el ambiente donde debía operar el sistema y la posibilidad de actualización a nuevas tecnologías de este, para garantizar una solución que se ajustara a la actualidad del mercado.

4.2 Obtención y análisis de la información

Las bases para empezar la investigación necesaria para plantear las alternativas de solución fueron las restricciones y alcances que debía tener el sistema. De esta forma, parte importante de la información se obtuvo mediante entrevistas y consultas al ingeniero de planta de la empresa y al asesor del proyecto de DIGICONTROL S.A.

Varias consultas en Internet a páginas de los principales fabricantes de equipo para uso industrial fueron necesarias para empezar con la evaluación de las alternativas de solución. Se examinaron los alcances que debía tener la máquina, las mejores opciones para el control de dispositivos, la compatibilidad del sistema con protocolos de comunicación, compatibilidad con interfaces de monitoreo y control, compatibilidad con sensores y actuadores, y opciones de actualización como características requeridas.

En cuanto se llegó a un acuerdo común para la solución, se empezó una etapa de estudio utilizando como recurso manuales del PLC seleccionado así como de todos los módulos que fueron requeridos para la aplicación, manual de cada uno de los dispositivos que se requería controlar en la máquina, libros de control automático y programación de PLC, y algunos artículos y discusiones en foros en Internet.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Luego de obtener la información de distintas alternativas para una solución que reuniera las características que se describieron anteriormente, fue necesario hacer una evaluación de éstas, de sus ventajas y desventajas, y se verificó que cumplieran con los requerimientos del proyecto. Se realizaron cotizaciones y análisis de costos, alcance de los equipos, se evaluó la flexibilidad y facilidad para la implementación, entre otros criterios para escoger la mejor opción.

Se decidió que el hardware que se iba a adquirir tuviera características modulares, facilidad para su mantenimiento y programación, que la capacidad de entradas y salidas fuera suficiente para las necesidades del proyecto, que fuera robusto y estable, y que fuera conocido en el campo industrial.

Estos criterios junto con la experiencia de los expertos mencionados fueron razones importantes en la solución seleccionada para el proyecto.

4.4 Implementación de la solución

Para implementar el sistema, fue necesario realizar una serie de actividades dentro y fuera de la planta, entre las que destacan:

- a. Diseñar un panel de conexiones tipo fondo falso de pared, en el que se colocaron y cablearon los elementos de control requeridos. En este panel se distribuyeron elementos como: el PLC y sus módulos, los controladores para servomotores, contactores, breakers, regletas y ductos para conductores principalmente.
- b. Fue necesario tirar el cableado de los servomotores, electroválvulas y transductores utilizados hasta el panel (que se ubicó en una pared a menos de diez metros de la máquina) y conectar estos elementos al sistema de control.
- c. Hacer pruebas de continuidad y comunicación entre el PLC y los demás elementos. Para esto, se tuvieron que fabricar los cables para comunicación serie RS-232.
- d. Hacer pruebas de desplazamiento de las estructuras mecánicas en donde se alojan los pistones y troqueles, así como medir las relaciones lineal-rotacional de éstas y programar los factores de escala calculados en los controladores de servomotores, por último, hacer mediciones de la precisión obtenida al mover estas estructuras.

- e. Medir la circunferencia del rodillo de arrastre, programar este parámetro en el controlador del servomotor, hacer pruebas de desplazamiento de una lámina y evaluar la precisión.
- f. Hacer pruebas del control de velocidad diseñado para los pistones hidráulicos y tomar las formas de onda para verificarlas con el desempeño esperado
- g. Probar el funcionamiento del sistema con dos recetas diferentes para verificar que el desempeño sea el que se planteó en el objetivo de este proyecto.

A lo largo de la implementación del sistema en la planta fue necesario incluir a la solución un procedimiento para la calibración de los servomotores, esto debido a que cuando los controladores de los servomotores se reinician, pierden la posición cero o HOME además de que cambian el modo de desplazamiento de direcciones absolutas a relativas, esto no permite el funcionamiento correcto del sistema y no fue tomado en cuenta cuando se planteó la solución, por tanto tuvo que diseñarse una sección para esto.

Para evaluar la propuesta de la solución se llevaron a cabo una serie de pruebas de campo, de las cuales se habla al principio de esta sección, con las cuales se evalúa el desempeño de la solución una vez implementada.

Este informe es elaborado para dar a conocer los resultados de un problema real al que se dio solución utilizando el conocimiento de ingeniería y la tecnología de punta, el mismo estará disponible en versiones impresa y digital en la biblioteca del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago.

4.5 Reevaluación y rediseño

Cabe mencionar en este punto las futuras mejoras que se pueden llevar a cabo al sistema implementado. Claro está que la empresa deberá evaluar el desempeño de la solución y deberá establecer prioridad en los cambios que se requieran, además de estudiar si es factible y/o necesario ajustarse a nuevas tecnologías o agregar nuevas funciones a la máquina troqueladora y a la línea de producción en sí. Eventualmente, distintas mejoras surgirán con el uso del sistema, sin embargo algunas ideas se brindan a continuación:

La implementación de una base de datos y monitoreo remoto es una opción de mejora que llegaría a proveer un mejor control sobre la producción y el mantenimiento requerido del sistema. Se puede actualizar el sistema actual y agregar un módulo de comunicación EtherNet para acceder a una base de datos en un servidor conectado a Internet para así tener más control del proceso, evitar tiempos muertos, acceder a un historial de errores de la máquina, tener tablas de producción, acceder al control de distintas secciones de la línea de producción, todo esto desde cualquier lugar en donde haya una conexión a Internet. Esto y otras funciones que el sistema no tiene disponibles en este momento se pueden llegar a implementar en una etapa futura.

Aunque el enfoque central de este proyecto es la sección de troquelado, cuando se empezó a diseñar y a seleccionar soluciones para el proyecto se tuvo que hacer pensando en las otras secciones de línea y planear como se podían interconectar y comunicar, así el sistema implementado permite mejoras y facilita el diseño de las demás secciones utilizando el mismo hardware y agregando pocos elementos. En este contexto, otra mejora que se puede resaltar es la implementación de múltiples HMIs para el control de las demás secciones de la línea, así el usuario puede percibir un sistema de manejo y de monitoreo de la línea independiente para cada sección, importante para las secciones que necesitan supervisión como lo es el desbobinado y alimentación del material.

Pensando en mejoras para la producción y en la disminución de tiempos muertos, es aconsejable contar con un sistema de respaldo tipo UPS (Uninterruptible Power Supply) para proporcionar energía eléctrica a los elementos de control, PLC y a los controladores de servomotores principalmente. De esta manera, ante cualquier corte momentáneo de energía los controladores de servomotores no perderán su referencia y no será necesario estar calibrando el equipo cada vez que suceda esto.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

A continuación se brinda una explicación del diseño de la solución implementada. Primero se hace un análisis de las distintas opciones que se consideraron para llegar a escoger la mejor alternativa de solución para el proyecto y luego se explican detalladamente aspectos de hardware a considerar y el diseño del software que hace funcional el sistema.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Parte importante del proceso del diseño en ingeniería, luego de entender y analizar completamente el problema, es buscar distintas opciones de solución y escoger la que mejor se adapte al proyecto. Para esto es necesario la evaluación de las ventajas y desventajas de las distintas opciones, basándose en criterios de expertos y en las restricciones del proyecto, para así llegar a elegir la mejor opción para implementar la solución.

Los aspectos a tener en cuenta para la evaluación de estas opciones se basan primeramente en las restricciones del proyecto, listadas en la sección 1.2 de este informe, en resumen: el sistema debe ser capaz de comunicarse con los controladores de los servomotores existentes, correr un control automático para los pistones utilizando las electroválvulas y transductores existentes, permitir el monitoreo y control de la máquina, y ser escalable. Además de criterios como costos, facilidad de implementación, flexibilidad, entre otros explicados anteriormente.

Acerca de los dispositivos a controlar:

- a. Los controladores de los servomotores se pueden controlar, un tipo por medio de entradas analógicas o por comandos ASCII vía RS-232 o RS-485, el otro tipo de controlador solamente admite la opción de comandos ASCII vía RS-232. Por tanto, fue indispensable que la solución a implementar tuviera facilidad y compatibilidad con las comunicaciones serie RS-232.
- b. Las electroválvulas a utilizar son comandadas por tensión de -10 a 10 VDC y los transductores dan una señal analógica proporcional a la posición de 0 a 10 VDC.

Algunas opciones que fueron evaluadas para la solución de este proyecto se analizan a continuación:

5.1.1 Computadora e interfaz de control

Se evaluó como posible solución implementar una computadora industrial que se comunicara por puerto serial con los controladores de servomotores. En estas computadoras es fácil encontrar puertos de comunicación RS-232 para este requerimiento.

Una ventaja que tiene la computadora, es que el control y el monitoreo del sistema se puede implementar en una interfaz gráfica, lo cual permite un buen manejo de las funciones de la máquina, la programación de recetas se hace sencilla al usuario, se dispone de una gran capacidad de memoria, se pueden manejar fácilmente tablas e historiales y todo esto se puede acceder desde Internet si fuera necesario.

Por otra parte, implementar un software para un control industrial es más laborioso y requiere más tiempo en una computadora que en otro hardware de control. Se tiene como gran desventaja que la computadora tiene un precio elevado, así como los módulos de interfaz para entradas y salidas, ya que éstos son dispositivos de control independientes con comunicación a la PC.

Además, para llevar a cabo el control de los pistones hidráulicos sería necesario agregar un módulo de control independiente para cada uno de los diez pistones y que cada uno se comunicara por un bus dedicado hacia la computadora para su accionamiento, lo cual incrementaría el costo del proyecto. Sin embargo, la computadora con módulos de interfaz independientes cumple con los requerimientos del proyecto, compatibilidad, escalabilidad y monitoreo, pero a un precio elevado.

5.1.2 Tarjeta basada en microcontrolador

La idea es diseñar una tarjeta basada en un microcontrolador que tenga interfaces RS-232, convertidores de digital a analógico para comandar electroválvulas proporcionales, convertidores de analógico a digital para leer las señales de los transductores, que tuviera también entradas y salidas digitales (contactos), o bien que se pudiera interconectar con otra tarjeta para el control de las otras partes de la línea que se planea desarrollar luego.

Esta opción tiene la ventaja de ser la más económica en hardware, esto permitiría que el sistema tuviera inclusive tarjetas de repuesto para dar mantenimiento rápidamente en caso de algún fallo. Además un microcontrolador tiene la capacidad suficiente de correr bien un sistema de control automático, muchos de ellos utilizando variables flotantes (números decimales) para cálculos matemáticos. Aunque las entradas/salidas de estos dispositivos están limitadas, éstos permiten la interconexión tipo esclavo-maestro para ampliar sus capacidades. Con una tarjeta que se adapte a las características eléctricas de los elementos a controlar, la solución suena viable, sin embargo existen muchos problemas asociados a esta opción:

Uno de ellos es el sistema de monitoreo y control. El sistema debería tener un teclado y una pantalla, esto sin duda implicaría una interfaz con el usuario deficiente, sería difícil programar recetas, no se podría tener un monitoreo adecuado de las variables, habrían muchos menús y texto cortado o abreviado para dar las instrucciones al usuario, en fin una desventaja inaceptable para el proyecto.

Otra desventaja es la poca estabilidad y robustez del dispositivo ante un ambiente industrial en donde existen muchas fuentes de ruido que pueden ocasionar un mal funcionamiento del sistema.

Por último, aunque sobresale el bajo precio de esta opción en cuanto al hardware, el costo en tiempo y recurso humano que lleva el desarrollo de una tarjeta de este tipo y el diseño del software (de alta complejidad y uso de lenguaje de bajo nivel) para la aplicación, llegan a ser al final los factores que van a aumentar el precio de la solución y el tiempo para la implementación.

Los factores negativos en este caso fueron causa suficiente para que esta opción no fuera implementada en el proyecto.

5.1.3 PLC y botoneras

Esta opción consiste en utilizar un Controlador Lógico Programable o PLC para realizar el control de la máquina. Esta opción es muy utilizada a nivel industrial, tiene un costo moderado y ha sido probada y optimizada para esta rama de control de procesos. Los fabricantes de este hardware ponen a la disposición un software para la programación que es sencillo de usar, utiliza un lenguaje gráfico para programar el dispositivo (diagrama de escalera) y permite la opción de depurar, encontrar y solucionar errores en la programación en tiempo real y en uso del sistema, lo cual simplifica la implementación de la solución y es una gran opción para el mantenimiento futuro.

Los PLC son dispositivos completamente escalables y permiten que se les adapte módulos para distintas aplicaciones, como entradas y salidas analógicas y digitales, módulos para comunicaciones seriales, módulos para EtherNet, entre otros; además en su programación existe una serie de instrucciones para el uso del protocolo ASCII y el control PID. Se evaluó además, la opción de hacer una estación que tuviera una serie de botones y luces piloto para comandar la máquina, observar el estado de variables, elegir recetas y controlar manualmente distintas secciones de la línea de producción.

Esta opción cumple con todos los requerimientos del proyecto menos con el control y monitoreo, este tipo de solución no permitiría al usuario programar recetas, solamente escoger una que haya sido programada en el sistema, tampoco permitiría el uso de contraseñas, edición de parámetros o visualización de mensajes de error. En este aspecto esta solución no cumple con lo requerido al igual que la solución basada en microcontrolador.

El uso del PLC es la mejor opción hasta el momento, pero éste necesita una interfaz amigable con el usuario que permita comandar la máquina, que sea fácil de usar y que esté capacitada para cumplir con todas las opciones de control que se han venido mencionando. A continuación se muestra la alternativa que se escogió para implementar la solución de este proyecto.

5.1.4 PLC y HMI

La opción de utilizar un PLC se evaluó como una muy buena alternativa, además la empresa tenía ya algunos módulos para PLC (entradas y salidas digitales) y la licencia del software de programación, por lo que fue necesario adquirir el chasis, el CPU, módulos de entradas y salidas analógicas, un módulo de comunicaciones RS-232 y además una Interfaz Humano Máquina o HMI para controlar y monitorear el sistema. El HMI seleccionado es una pantalla táctil que tiene una conexión permanente con el PLC en la cual se puede leer y cambiar variables en todo momento. La programación de este dispositivo es tipo gráfica y se hace fácil y rápidamente, lo cual conlleva a una rápida implementación del equipo, además su precio es moderado comparándolo con el ahorro en tiempo que facilita.

En esta opción se reúnen todas las ventajas que tiene un PLC y la interfaz de control y monitoreo para así cumplir con las especificaciones del proyecto, lograr una implementación fácil y rápida, amigable con el usuario, robusta, con gran uso y diversidad en el mercado y aun precio moderado.

Por todo lo anterior se decidió que ésta era la opción más viable y fue la que se implementó finalmente.

5.2 Descripción del hardware

En esta sección se explica todo lo referente al hardware utilizado, se describe en forma detallada la estructura de cada uno de los bloques que conforman el sistema implementado. Se analizan aspectos de diseño como características eléctricas de dispositivos y las conexiones de estos. En la figura 5.1 se muestra un diagrama de bloques detallado de la solución.

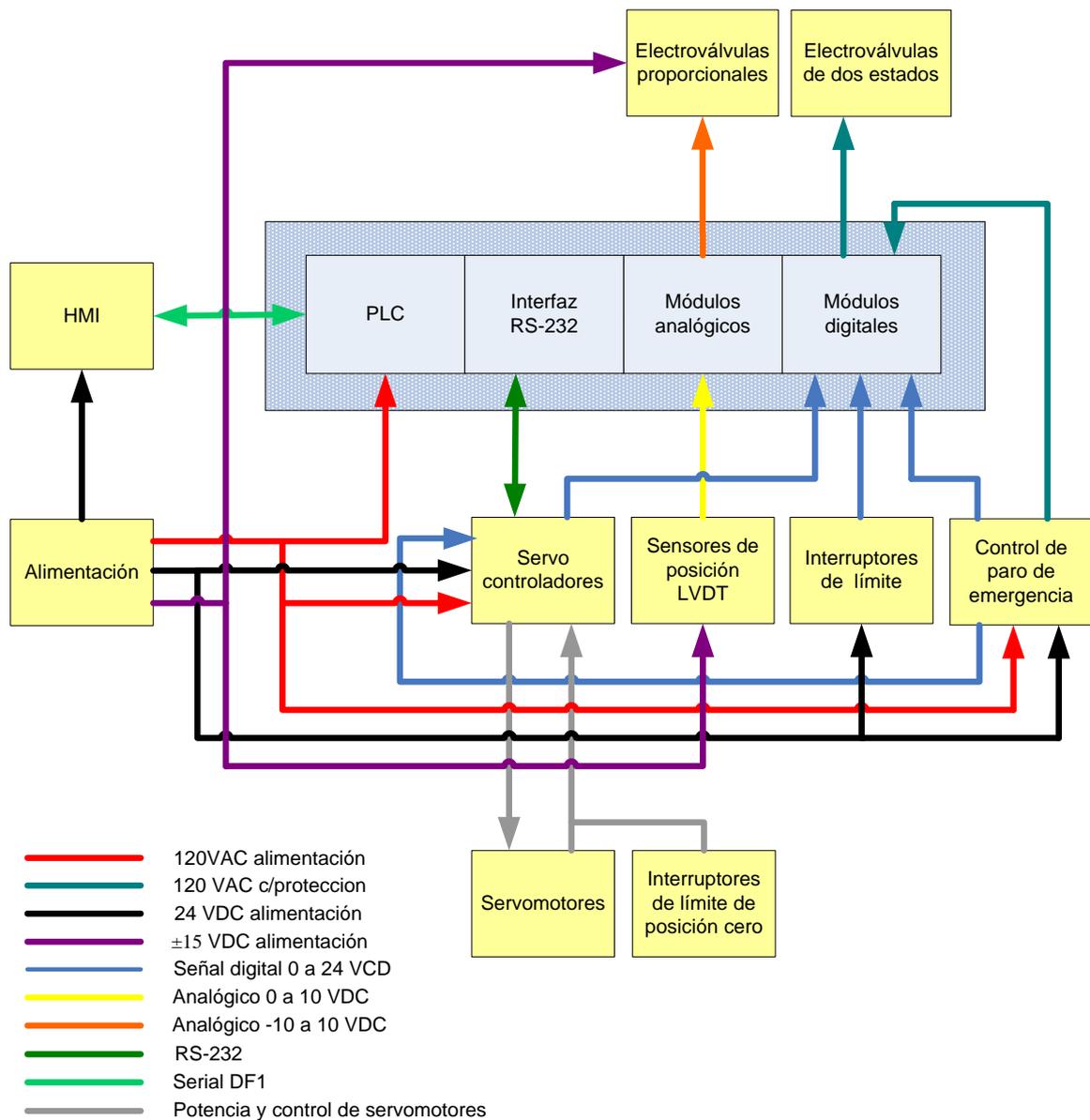


Figura 5.1 Diagrama de bloques detallado de la solución.

5.2.1 PLC

El PLC es el dispositivo central de control del sistema. Se utilizó el modelo ALLEN BRADLEY SLC 5/04 con el CPU 1747 L543/C junto con el software RSLOGIX 500. Éste tiene 64KB de memoria disponible para programa y se le pueden adaptar hasta 30 módulos de expansión, utilizando para esto varios chasis de conexión.

Este modelo de PLC soporta además de las instrucciones estándar, un alto procesamiento matemático, instrucciones optimizadas para control PID, direccionamiento indirecto y manejo de palabras ASCII.

En cuanto a las comunicaciones, este controlador tiene un puerto DH+ (Data Highway Plus) para conexiones con otros procesadores y hardware de monitoreo, pensado para ampliar en un futuro el sistema. Tiene un puerto RS-232 utilizado con el protocolo DF1 full-duplex que es el que se utilizó para conectar la interfaz HMI.

Se lista a continuación el hardware necesario y existente para el sistema.

Para este proyecto fue necesario adquirir:

- Una fuente, 1746-P4
- Un PLC, SLC 5/04 con CPU 1747 L543/C
- Un módulo de comunicación RS-232, 1746 BAS
- Un módulo de 16 entradas analógicas de voltaje, 1746-NI16V
- Tres módulos de 4 salidas analógicas de voltaje, 1746-NO4V
- Un chasis para 7 módulos, 1746-A7
- Un cable para programación, 1747-CP3
- Un cable para interconexión de chasis, 1746-C16

La empresa tenía el siguiente hardware:

- Una fuente, 1746-P2
- Un chasis para 13 módulos, 1746-A13
- Seis módulos de 16 salidas digitales de contacto, 1746-OW16
- Seis módulos de 16 entradas digitales de 24VDC, 1746-IB16
- HMI Maple 520M-006

En las tablas 5.1 y 5.2 se muestra la configuración utilizada de módulos y el requerimiento o función que desempeña cada uno de estos, en otras secciones se va a explicar en detalle la utilización y conexión. Aunque no se utiliza la totalidad de módulos existentes en este proyecto, igualmente se interconectaron los dos chasis y se dejaron las ranuras restantes para el control de las otras secciones de la línea de producción.

Tabla 5.1 Configuración de módulos y PLC chasis 1.

Ranura	Descripción	Función
0	PLC	Control, Comunicación con HMI
1	2 Puertos RS-232	Comunicación con 2 servocontroladores
2	16 Entradas analógicas	Lectura de posición de 10 pistones
3	4 Salidas analógicas	Comando de 4 electroválvulas
4	4 Salidas analógicas	Comando de 4 electroválvulas
5	4 Salidas analógicas	Comando de 2 electroválvulas
6	16 Entradas digitales	Señales de los servocontroladores

Se adquirieron varios módulos de 4 salidas analógicas en lugar de uno sólo de 12 o más salidas por disponibilidad en el mercado (se daba una situación similar con el módulo de entradas analógicas), además los módulos de menos salidas tienen un precio menor y de todas maneras era necesario adquirir otro chasis para conexión.

Tabla 5.2 Configuración de módulos y PLC chasis 2.

Ranura	Descripción	Función
7	16 Salidas digitales	Manejo de contactores y electroválvulas
8	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
9	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
10	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
11	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
12	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
13	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
14	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
15	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
16	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
17	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
18	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones
19	Vacío	Previsto para automatización de otras secciones

De esta forma, el PLC cumple con los requerimientos planteados para el sistema y tiene varias ranuras disponibles para agregar otros módulos para las etapas siguientes a este proyecto. Una mirada más a fondo a los módulos utilizados se da a continuación.

5.2.2 Interfaz RS-232

Debido a que el puerto de comunicación serial del módulo del PLC fue utilizado para conectar la interfaz HMI, fue necesario adquirir un módulo que permitiera la comunicación serial necesaria para los dos tipos distintos de servocontroladores necesarios.

El módulo adquirido fue el 1746-BAS (figura 5.2), el cual es un módulo independiente que tiene dos puertos para comunicación con los estándares RS-232, RS-423, RS-422, RS-485 y un puerto exclusivo para establecer una red DH485. Este dispositivo necesita ser programado y configurado para que cada puerto opere según lo requerido, en la sección de descripción del software de este informe se explicará al respecto.

Aunque la máquina troqueladora cuenta con 14 servomotores, 13 de ellos son controlados por servocontroladores del mismo modelo y utilizan un protocolo distinto al que controla el motor de arrastre. Por este motivo el módulo para comunicación serial debe tener dos puertos dedicados para el control de estos dispositivos. En el puerto PRT1 se conectaron los controladores BA Intellidrive y en el PRT2 se conectó el controlador ECODRIVE03.

El servocontrolador del motor de arrastre se conecta directamente como se muestra en la figura 5.3, según especificación del fabricante. En esta figura se muestra la conexión del controlador a una computadora u otro tipo de dispositivo de control en este caso el módulo de comunicaciones del PLC.

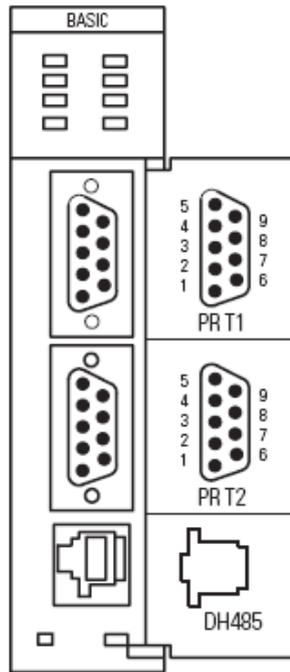


Figura 5.2 Módulo 1746-BAS con la puerta abierta [14].

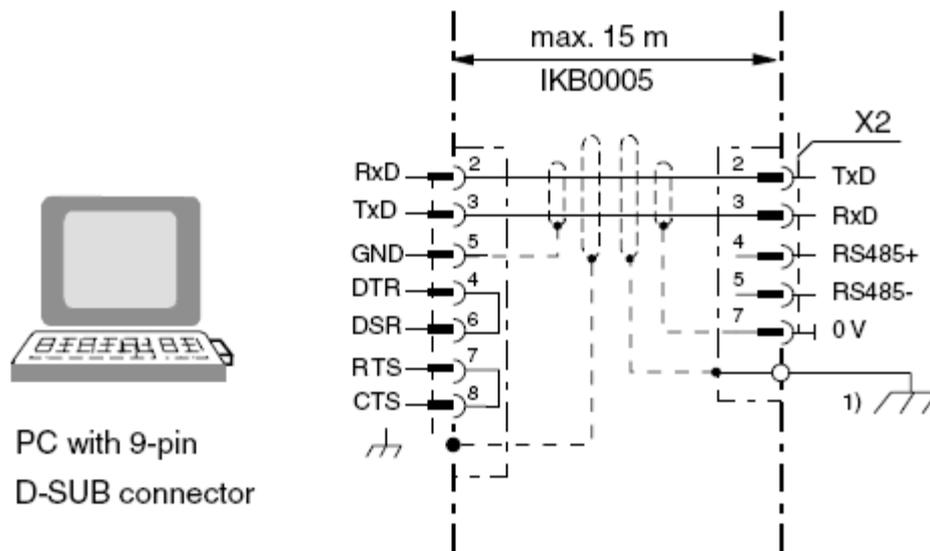


Figura 5.3 Conexión del controlador Rexroth Indramat ECODRIVE03 puerto X2 con dispositivo de control: PC o PLC [12].

Es importante destacar de la figura 5.3 que la longitud máxima del cable de comunicación establecida en el estándar RS-232 es de 15 metros para garantizar que la atenuación de los niveles de tensión con la distancia no sean problema para establecer una buena comunicación. Otro aspecto importante que se debe tomar en cuenta es el blindaje de los cables y la conexión de estos a tierra para

minimizar los efectos de ruido, ya que cerca de los cables de comunicación van pasar líneas de potencia para los motores y es fácil que se induzcan corrientes no deseadas en los conductores ocasionando posibles fallos en el funcionamiento del sistema. Este mismo concepto fue aplicado a todas las conexiones de comunicación del sistema.

El puerto restante del módulo se utilizó para enlazar los 13 servocontroladores restantes de la máquina. Estos dispositivos son del mismo modelo y permiten una conexión en anillo conocida como daisy chain, de esta manera la señal Tx (transmisión) del dispositivo A se conecta a la de recepción (Rx) del dispositivo B, el Tx del dispositivo B al Rx del C. El último dispositivo en la cadena debe conectar la señal Tx, de regreso a la recepción de la unidad de control, en este caso el PLC. Se pueden incluir un máximo de 48 controladores en este tipo de conexión y a cada uno se le debe establecer una dirección única para comandarlo. En la figura 5.4 se ilustra esta conexión.

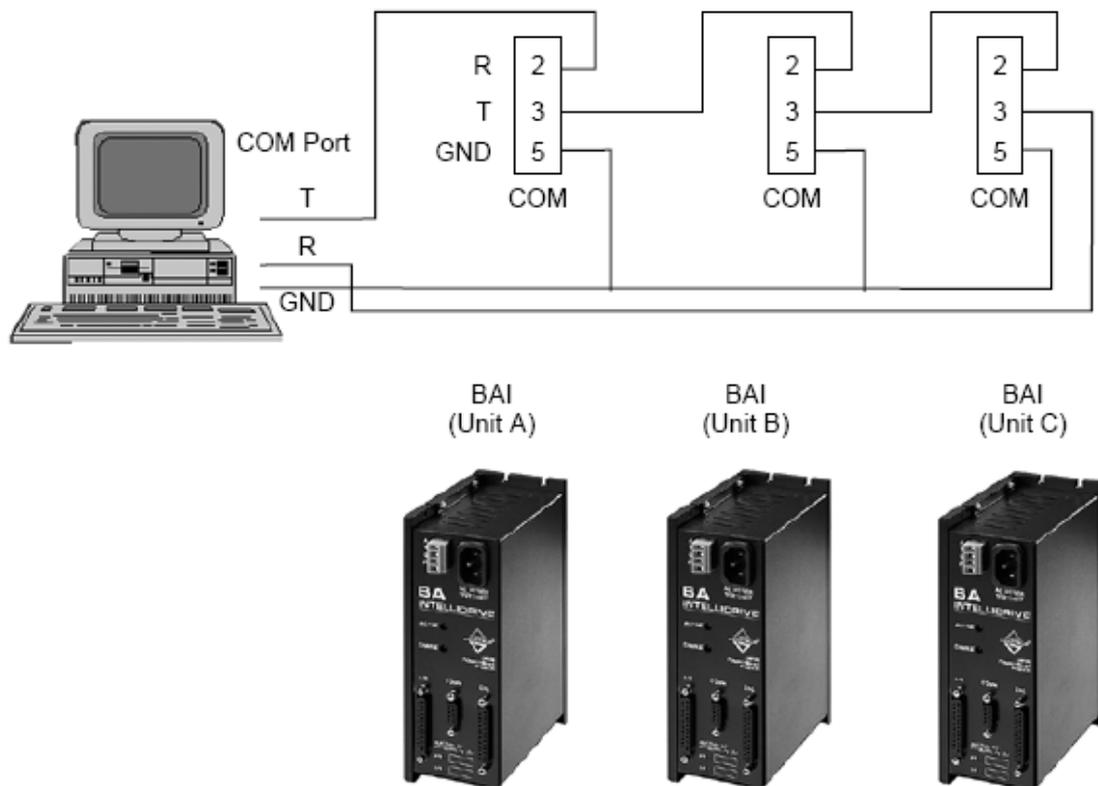


Figura 5.4 Conexión Daisy Chain para comunicación RS-232 del controlador Aerotech BA Intellidrive con dispositivo de control: PC o PLC. [1]

Estas conexiones para los servocontroladores permite al PLC comandar estos dispositivos utilizando el módulo de comunicación agregado. Las mismas

conexiones son utilizadas para parametrizar, configurar y diagnosticar las unidades conectándolas a una computadora y utilizando el software que brinda el fabricante, lo cual fue un paso importante en el desarrollo del sistema final.

5.2.3 Módulos analógicos

Los módulos analógicos que se adquirieron para este proyecto son necesarios para el manejo de electroválvulas proporcionales y lectura de datos de transductores de posición. Estos últimos dispositivos son accionados o brindan datos por tensión analógica, correspondientemente.

El módulo de entradas analógicas usado es el 1746-NI16V el cual es compatible con las siguientes señales de voltaje:

- $\pm 10V$ dc
- 1 a 5V dc
- 0 a 5V dc
- 0 a 10V dc *Señal de entradas utilizadas.

Se utilizó la señal de voltaje de entrada de 0 a 10V dc ya que este es el tipo de señal compatible con los transductores de posición.

Este módulo tiene 16 bits de resolución de entrada y consta de 4 convertidores de análogo a digital que se multiplexan para atender cada uno 4 entradas. La información se guarda en 16 registros accesibles por el PLC al igual que 16 palabras de estado de cada conversión hecha.

El dispositivo cuenta además con un filtro pasa bajas digital en el cual se puede configurar la frecuencia de corte. Este filtro fue configurado a 40 Hz para evitar las señales de ruido de la red eléctrica que funciona a 60Hz y sus armónicas propias del ambiente industrial. Entre más baja sea la frecuencia de corte para el filtro será mejor el rechazo de ruido pero el tiempo de respuesta será más bajo. Se seleccionó de esta manera una frecuencia tal que el cambio de la señal más rápida se encuentre debajo de la frecuencia de corte y que al mismo tiempo rechazara el ruido más común que es el de la red eléctrica.

El tiempo de muestreo del módulo analógico depende del número de convertidores utilizados, esto está relacionado también con la frecuencia de corte seleccionada para el filtro. El usuario puede configurarlo para usar las entradas que se necesiten. Por ejemplo con una frecuencia de 40Hz y utilizando las 16 entradas (los 4 convertidores de análogo a digital) el tiempo de actualización de datos en el PLC es de 100ms, si se utilizan de 9 a 12 entradas (3 convertidores A/D) ésta sería de 75ms, que es de hecho la configuración seleccionada para el sistema.

El módulo se debe configurar antes de ser usado para que opere según lo requerido, esto se hace en el programa principal del PLC usando las palabras de

configuración del módulo, procedimiento que se detalla en la descripción de software.

La tabla 5.3 muestra las conexiones hechas de los 10 transductores de posición (LVDT) utilizados hacia el módulo de entradas analógicas del PLC.

Tabla 5.3 Conexión del módulo de entradas analógicas del PLC.

Señal	Código en el PLC	Conectado a:
IN-0	I:2.0	LVDT - 1
IN-1	I:2.1	LVDT - 2
IN-2	I:2.2	LVDT - 3
IN-3	I:2.3	LVDT - 4
IN-4	I:2.4	LVDT - 5
IN-5	I:2.5	LVDT - 6
IN-6	I:2.6	LVDT - 7
IN-7	I:2.7	LVDT - 8
IN-8	I:2.8	LVDT - 9
IN-9	I:2.9	LVDT - 10
IN-10	I:2.10	----
IN-11	I:2.11	----
IN-12	I:2.12	----
IN-13	I:2.13	----
IN-14	I:2.14	----
IN-15	I:2.15	----
Analog COM		COM

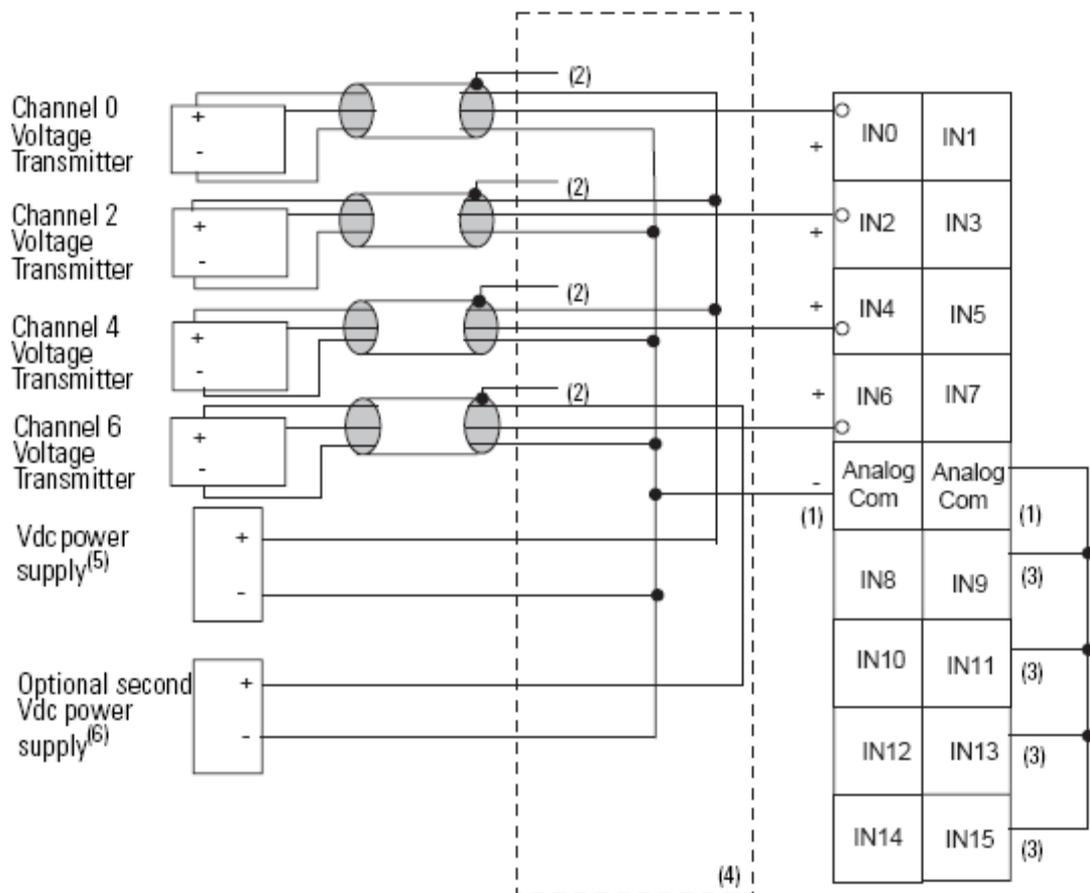
En la figura 5.5 se muestra un ejemplo de la forma en que recomienda el fabricante realizar las conexiones de los transductores hacia el módulo de entradas analógicas.

En cuanto a las salidas analógicas, se adquirieron para este fin tres módulos 1746-NO4V los cuales son compatibles con las siguientes señales de voltaje:

- $\pm 10V$ dc *Señal de salidas utilizadas.
- 1 to 5V dc
- 0 to 5V dc
- 0 to 10V dc

Se utilizó la señal de voltaje de salida de $\pm 10V$ dc ya que este es el tipo de señal compatible con las electroválvulas proporcionales que accionan los pistones hidráulicos de la máquina troqueladora. El PLC maneja una tabla de 4 palabras digitales que están mapeadas al módulo, cada una acciona una salida, así variando esta palabra entre valores de -32,768 a +32,764 se puede obtener un valor analógico proporcional en la salida. Más adelante se verá como es necesario

escalar estas palabras para poder ser utilizadas con las instrucciones PID del PLC.



- (1) There are two common terminals for all of the 16 voltage inputs. These two analog common terminals are connected internally.
- (2) All shield wires should be connected to chassis mounting screws.
- (3) Unused channels should be connected to the analog common terminals (0 Volts).
- (4) If separate shielded cables are used for each analog input channel, interposing terminal blocks are needed to terminate up to 16 common wires. Then, 1 to 4 common wires should be wired from the interposing terminal block to the 2 common terminals on the 1746-NI16V module.
- (5) The module does not provide loop power for analog inputs. Use a power supply that matches the transmitter specifications.
- (6) More than one power supply can be used if all supplies are class 2.

Figura 5.5 Conexión al módulo de entradas analógicas 1746-NI16V recomendada por el fabricante [14].

En las tablas 5.4, 5.5 y 5.6 se puede ver la conexión de cada uno de los módulos de salida a las electroválvulas proporcionales (EVP).

Tabla 5.4 Conexión del módulo 3 del PLC, salidas analógicas.

Señal	Código en el PLC	Conectado a:
OUT-0	O:3.0	EVP – 1
ANL COM		EVP COM
OUT-1	O:3.1	EVP – 2
ANL COM		EVP COM
OUT-2	O:3.2	EVP – 3
ANL COM		EVP COM
OUT-3	O:3.3	EVP – 4
ANL COM		EVP COM

Tabla 5.5 Conexión del módulo 4 del PLC, salidas analógicas.

Señal	Código en el PLC	Conectado a:
OUT-0	O:4.0	EVP – 5
ANL COM		EVP COM
OUT-1	O:4.1	EVP – 6
ANL COM		EVP COM
OUT-2	O:4.2	EVP – 7
ANL COM		EVP COM
OUT-3	O:4.3	EVP – 8
ANL COM		EVP COM

Tabla 5.6 Conexión del módulo 5 del PLC, salidas analógicas.

Señal	Código en el PLC	Conectado a:
OUT-0	O:5.0	EVP – 9
ANL COM		EVP COM
OUT-1	O:5.1	EVP – 10
ANL COM		EVP COM
OUT-2	O:5.2	EVP COM
ANL COM		EVP COM
OUT-3	O:5.3	EVP COM
ANL COM		EVP COM

En la figura 5.6 se muestra un ejemplo de la forma en que recomienda el fabricante realizar las conexiones de las electroválvulas (u otra carga) al módulo de salidas analógicas.

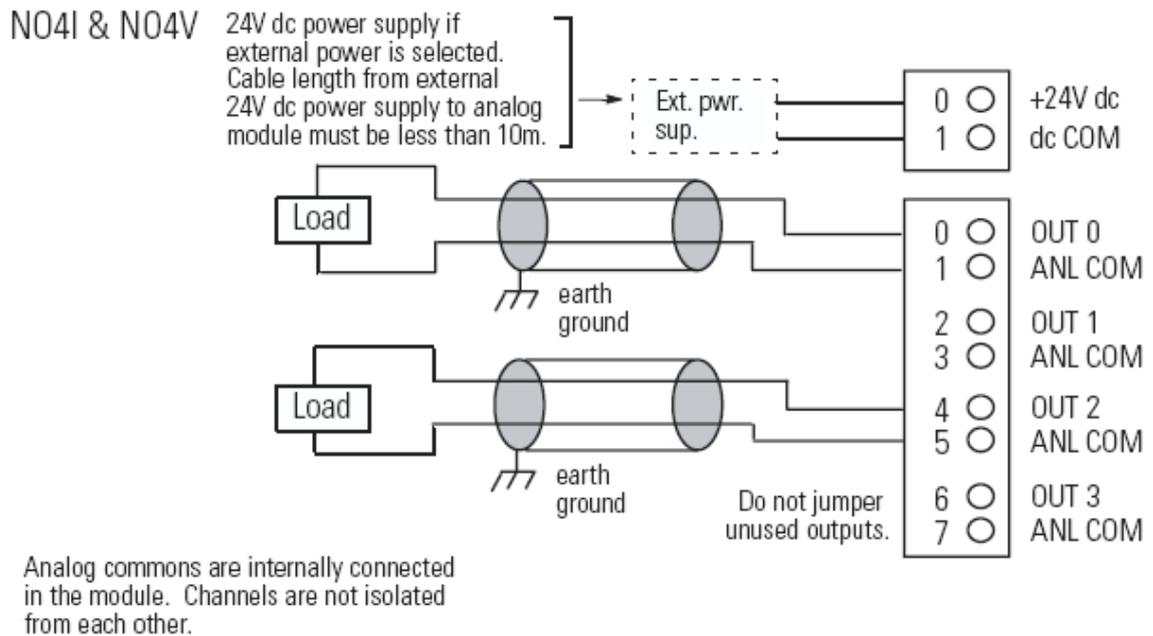


Figura 5.6 Conexión del módulo de salidas analógicas.1746-NO4V recomendado por el fabricante [14].

Se destaca al igual que con la conexión de las entradas, la conexión del blindaje al chasis del panel para evitar interferencias y tensiones inducidas.

5.2.4 Módulos digitales

Los módulos digitales requeridos en este proyecto se limitan al control del rodillo de arrastre del material, al monitoreo del estado de los servocontroladores y al accionamiento del contactor de potencia del controlador del servomotor de arrastre.

El módulo de entradas digitales utilizado es el 1746-IB16 de 16 entradas el cual se encarga de leer las siguientes señales:

- Paro de emergencia.
- Servomotores en posición.
- Servomotores OK.
- Rodillo de arrastre bajado.
- Controlador Indramat listo.

Del circuito de paro de emergencia llega una señal que es monitoreada por el PLC y se encarga de detener el sistema en caso de que de un paro indicado por el usuario. El circuito del paro de emergencia se explica más adelante en este informe.

La señal: Servomotores en Posición, evalúa que ninguno de los servomotores (de M1 a M13 en la figura 3.5) esté en movimiento, esto es necesario en el proceso

de troquelado como requerimiento antes de hacer algún agujero a la lámina o cortarla.

En la figura 5.7 se muestra el diagrama de conexión de los servocontroladores BA Intellidrive para obtener las señales: Servomotores en posición y Servomotores OK. En el puerto P1 de los servocontroladores la salida del bit “In Position” es opto acoplada, esto permitió cablear una compuerta OR de todas estas salidas en los 13 controladores utilizados (Output 3, pin 13), así si algún motor está en movimiento la salida se mantiene en bajo. Este mismo principio se utilizó para la señal Servomotores OK, utilizando la salida “General Fault” (Output 2 pin 12), así si alguno de todos los servocontroladores tiene un error la señal se mantiene en bajo. En este caso se da un mensaje en el HMI para que el usuario diagnostique el problema del controlador que presenta error, el cual da una señal luminosa para identificar el dispositivo, esto se hizo para ahorrar entradas del PLC.

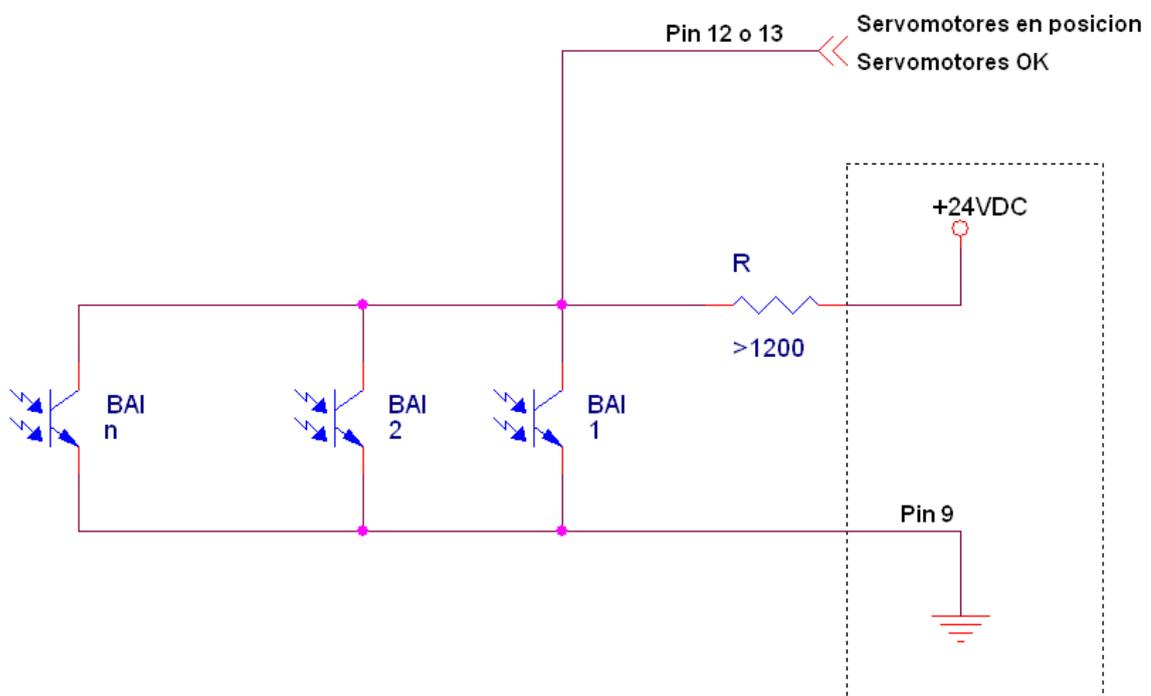


Figura 5.7 Conexión de servocontroladores BA Intellidrive al PLC, señales de servomotores en posición y servomotores OK.

La señal rodillo de arrastre bajado es otra entrada que debe ser monitoreada. Esta señal indica al sistema si la lámina está prensada entre los dos rodillos, esto es esencial para que la máquina funcione correctamente ya que sólo de esta manera la lámina es arrastrada, el rodillo se levanta únicamente cuando se debe cargar material. Esta condición se obtiene por medio de un interruptor de límite, en la figura 5.8 se muestra un ejemplo de la conexión de entradas digitales recomendada por el fabricante. Cabe destacar la conexión a tierra de los interruptores para lograr que las señales sean menos susceptibles al ruido.

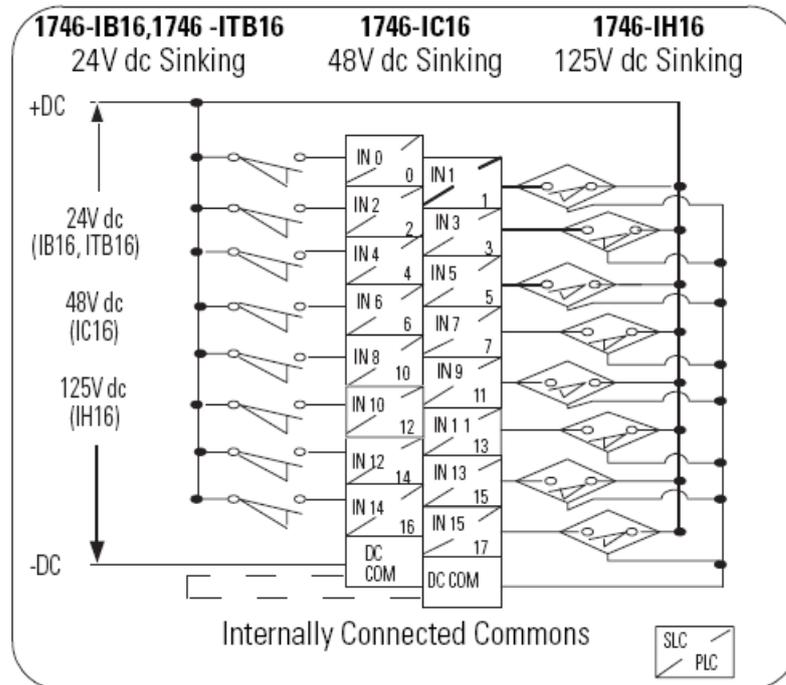


Figura 5.8 Conexión de entradas digitales al módulo 1746-IB16, recomendada por el fabricante [14].

Por último, una entrada importante conectada al sistema de control es la señal Ready proveniente del controlador Rexroth Indramat (pin X3-8), esta señal se evalúa para verificar cuando al dispositivo se le ha aplicado alimentación, está listo para ser usado y sin errores. En el HMI se programó una pantalla de diagnóstico para verificar el estado de varios dispositivos cuando se enciende el sistema.

En la figura 5.9 se puede ver el diagrama de conexión de las entradas digitales al PLC.

El módulo de salidas de relés es el 1746-OW16 de 16 salidas el cual se encarga de polarizar a través del contacto Bb (explicado en la sección servocontroladores) el solenoide del contactor que alimenta el amplificador de potencia del servocontrolador del motor de arrastre y de polarizar el solenoide para levantar o bajar el rodillo de arrastre ambos utilizando una tensión de 110VAC. También se utilizan dos señales de salida a 24VDC para comandar el controlador, como se explica en la sección de servocontroladores.

En la figura 5.10 se muestra un ejemplo de la conexión de las salidas de relés recomendada por el fabricante.

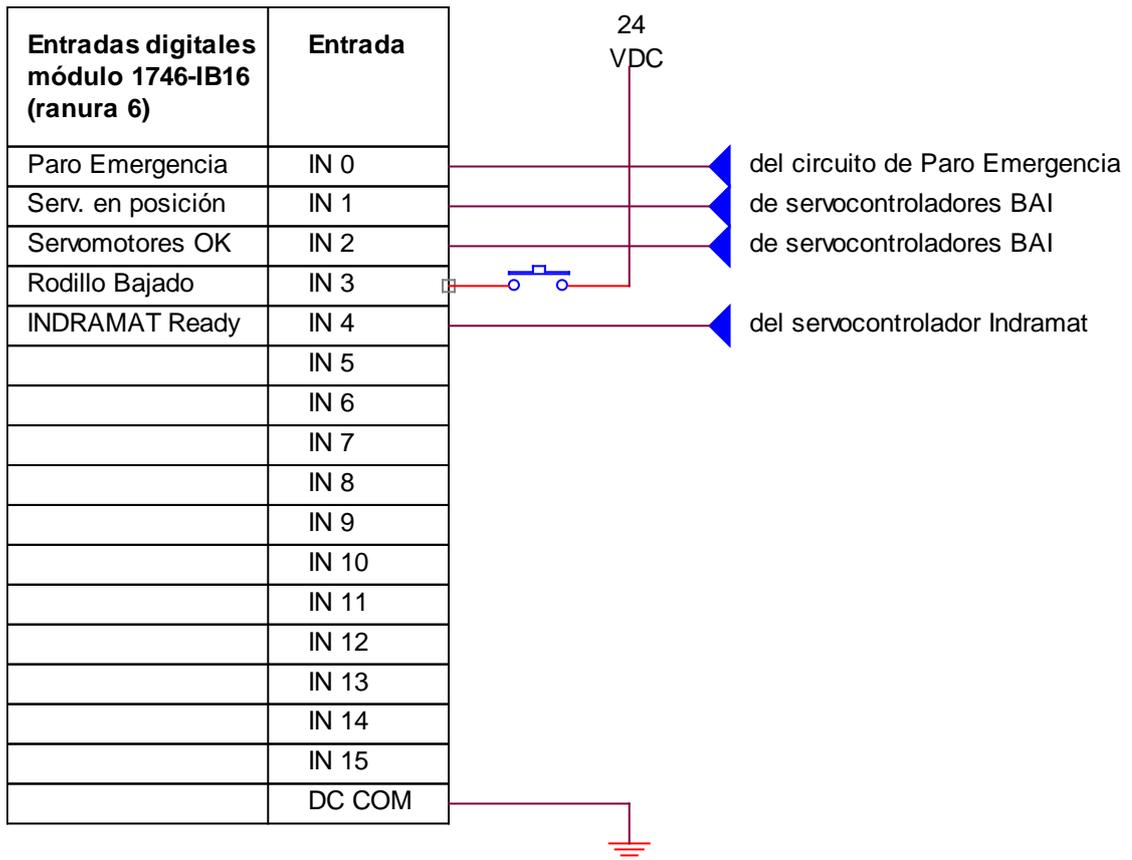


Figura 5.9 Conexión de las entradas digitales al módulo 1746-IB16.

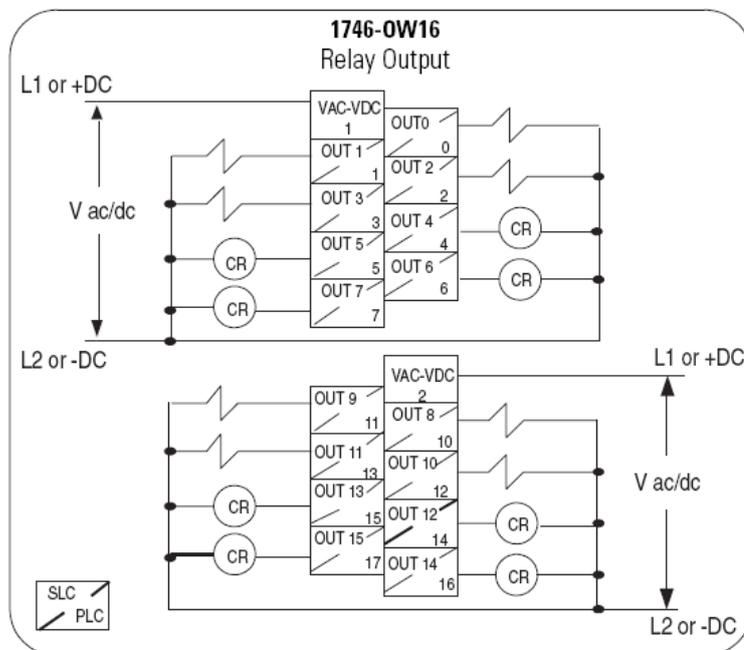


Figura 5.10 Conexión de las salidas de relés al módulo 1746-OW16, recomendada por el fabricante [14].

En la figura 5.11 se muestra el diagrama de conexión de las salidas de relé utilizadas, los contactos soportan una corriente aplicada continuamente en CA de 2.5A los cuales fueron protegidos con fusibles de 2A, corriente suficiente para polarizar los solenoides. El voltaje de entrada al módulo es de 120VAC con protección de paro de emergencia y 24VCD para señales al servocontrolador Indramat Ecodrive03.

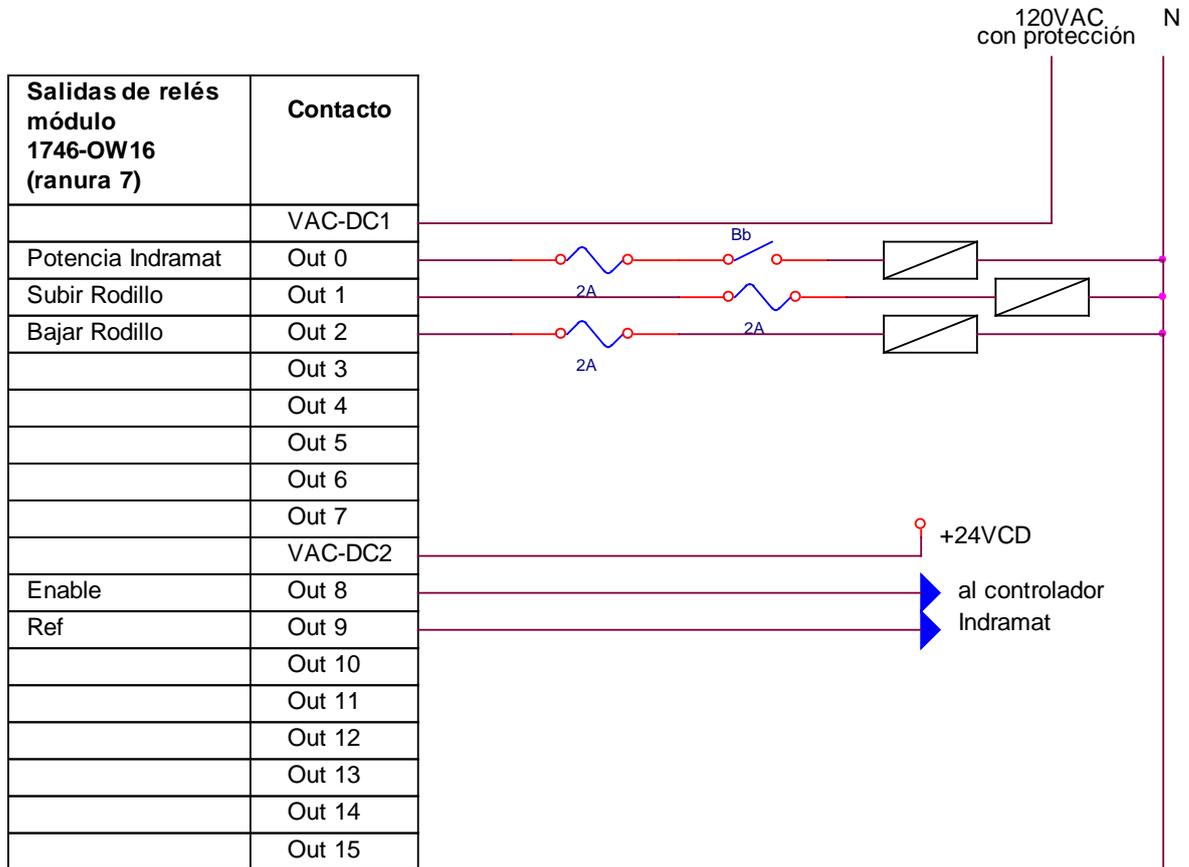


Figura 5.11 Conexión de las salidas de contacto al módulo 1746-OW16.

5.2.5 Alimentación

En esta sección se explica la manera en la que el sistema toma energía y los distintos niveles de tensión manejados. En la figura 5.12 se puede observar el diagrama eléctrico del circuito de alimentación del sistema.

En la toma principal de energía eléctrica de la empresa se conectó un transformador trifásico delta-estrella que reduce el voltaje de 460 a 110VAC (voltaje de fase) para el manejo de dos fuentes de CD, alimentación del PLC, alimentación de servocontroladores y manejo de electroválvulas.

El servo controlador Rexroth Indramat se alimenta de un voltaje de control (24VCD) y tiene además una toma de potencia a 460V. Se utilizó un breaker trifásico para proteger el controlador y otro para proteger el transformador.

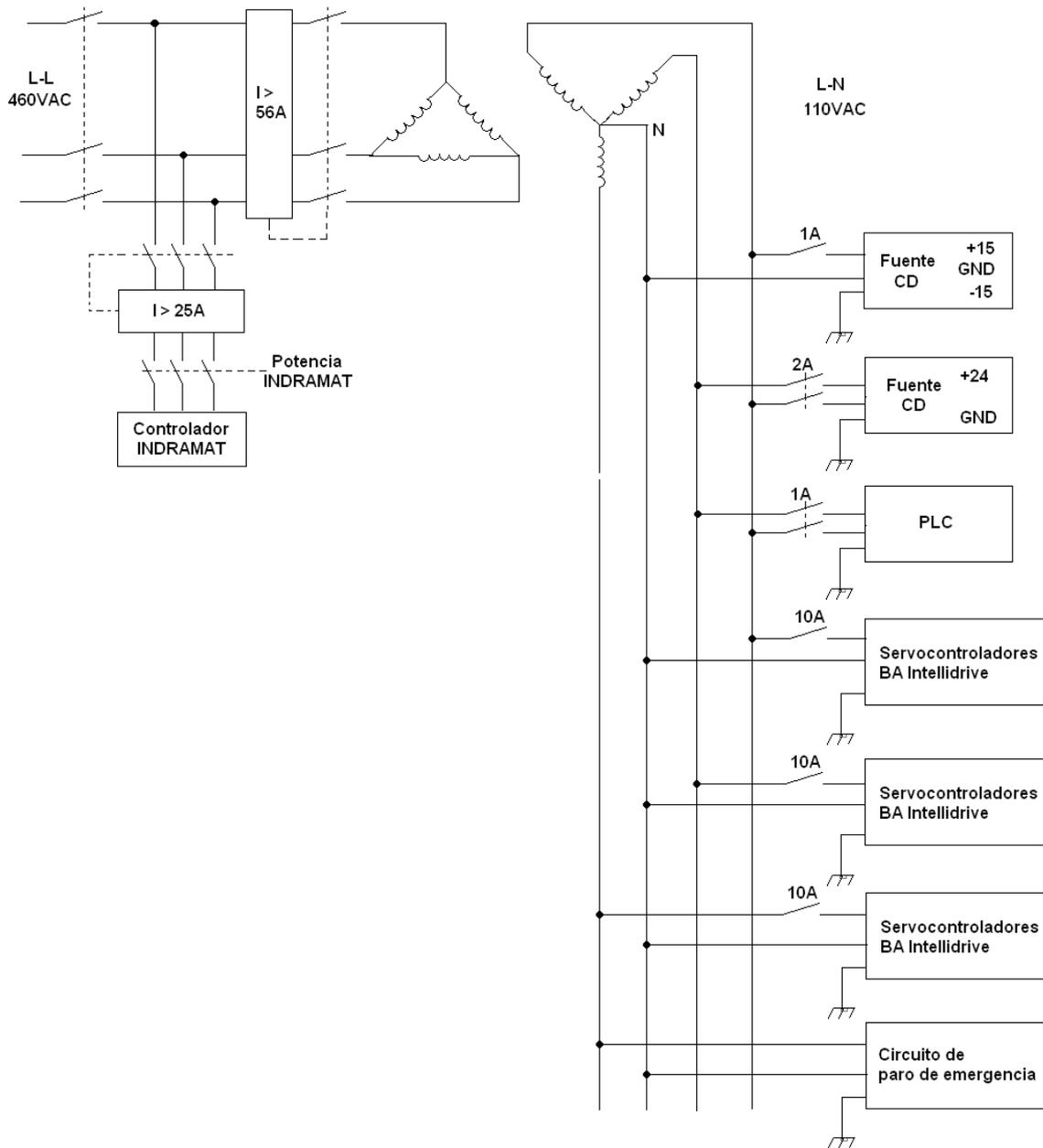


Figura 5.12 Circuito de alimentación del sistema.

De la fuente de $\pm 15VDC$ se alimentan las electroválvulas proporcionales y los transductores. La fuente de $24VDC$ alimenta el servocontrolador del motor de arrastre (Indramat), la interfaz HMI y se utiliza también para las entradas digitales, principalmente para los interruptores de límite.

Los servocontroladores BA Intellidrive se alimentan a $110VCA$, éstos se conectaron distribuidamente en las tres fases del transformador para balancear la carga vista por éste.

Adicionalmente, una toma de voltaje de $110VAC$ y $24VDC$ se hace llegar al circuito de paro de emergencia, como se verá luego.

5.2.6 HMI

Un requerimiento importante del proyecto es contar con una interfaz para el control y monitoreo de la máquina. Esto va a permitir al usuario controlar dispositivos de forma manual realizando tareas como el control individual de servomotores, accionamiento del rodillo de arrastre y accionamiento de pistones. Además, programar y correr recetas de troquelado, dar protección al sistema por medio del uso de contraseñas para el ingreso y observar el funcionamiento en tiempo real de la máquina.

Se buscó una interfaz que fuera de fácil uso para el usuario, que soportara el PLC utilizado y que tuviera una programación sencilla para minimizar el tiempo de diseño. La empresa tenía la Terminal de Interfaz para Operación (OIT) MAPLE HMI 520M-006 la cual se determinó adecuada para el proyecto. Esta interfaz ofrece una gran comodidad de manejo ya que está basada en una pantalla táctil, se conecta por puerto serial al PLC utilizando el protocolo DF1 sin necesidad de ningún otro hardware para adaptar señales, su programación es sencilla de forma gráfica y permite ser conectada con otras similares mediante el sistema maestro-esclavo lo cual la coloca dentro de la lista de opciones para la automatización del resto de la línea de producción.

La interfaz escogida tiene una pantalla de 5.7 pulgadas, resolución de 320x240, tiene un índice de protección tipo NEMA 4 referente a la carcasa del dispositivo y su costo es bajo. Todo esto la hace ideal para la aplicación deseada. En la figura 5.13 se puede observar el HMI utilizado con la pantalla inicial del sistema.



Figura 5.13 Interfaz Hombre Máquina (HMI) implementada.

5.2.7 Servocontroladores

Los servocontroladores son los dispositivos encargados de manejar los servomotores. En la máquina troqueladora se pueden distinguir dos tipos distintos de estos controladores: el controlador Rexroth Indramat Ecodrive03 que se encarga de controlar el motor de arrastre de la lámina el cual está sujeto a un rodillo para este fin; el otro tipo de controlador es el BA Intellidrive el cual se encarga de mover las estructuras de los pistones en la dirección de y, además controla los motores de las mesas guía que centran la lámina (son 13 en total). En la figura 5.14 se pueden observar los dos tipos de controladores utilizados.



Figura 5.14 Controladores de servomotor utilizados.

Las conexiones hechas en el controlador Indramat Ecodrive03 se pueden observar en la figura 5.15. Se puede destacar del diagrama eléctrico el tipo de conexión de potencia del dispositivo, se utiliza un breaker trifásico para proteger el

controlador, además de un filtro de línea que garantiza la Compatibilidad Electromagnética (EMC), éste concepto se entiende como la inmunidad suficiente a la interferencia electromagnética de un equipo y además de un bajo nivel de emisiones de interferencia electromagnética producida por éste que se transmite por los conductores a otros dispositivos en la red, en [13] se explica todo lo referente a la EMC y a la EMI, de ésta manera fue necesario conectar un filtro cuya función es prevenir la propagación de la interferencia electromagnética ocasionada por este controlador a las líneas de poder.

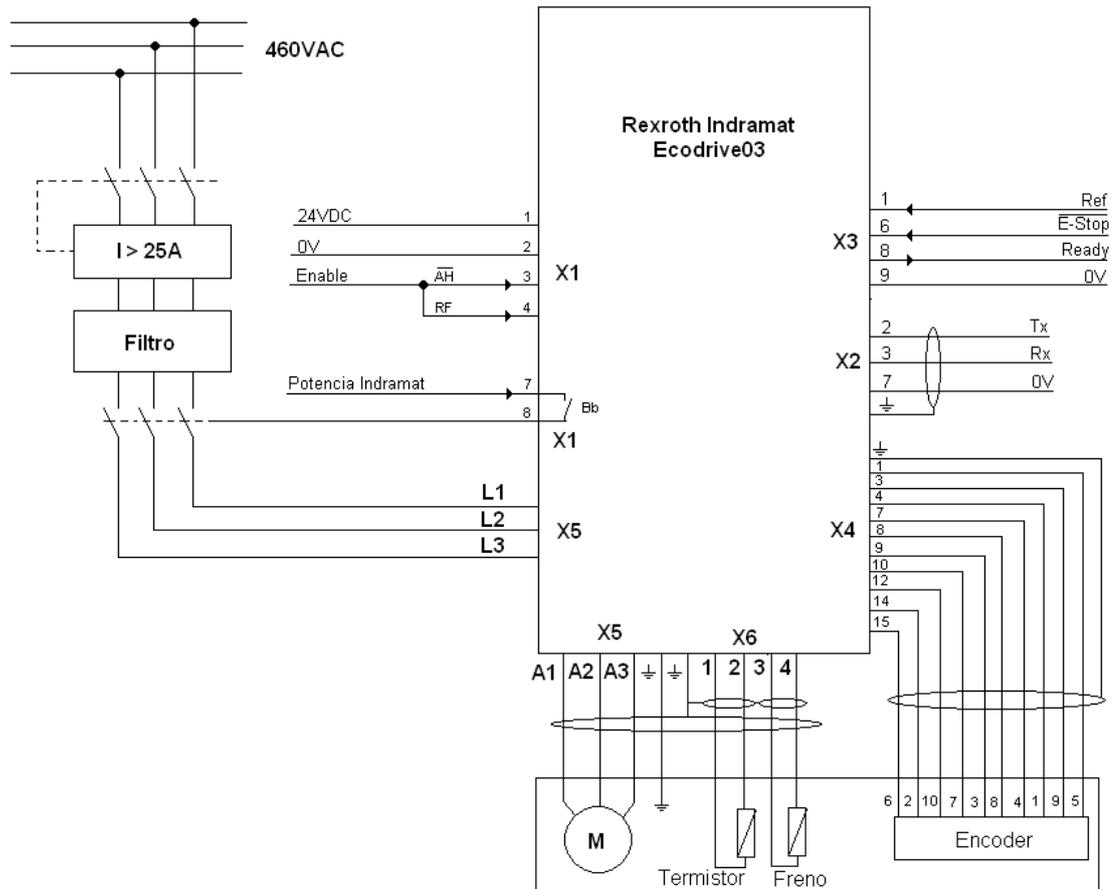


Figura 5.15 Diagrama eléctrico de conexiones del controlador Rexroth Indramat Ecodrive03.

Se puede observar la conexión del motor al controlador, el motor utiliza además un sensor de temperatura para protección del mismo y un freno para el caso de paradas de emergencia. Se muestra el cableado del encoder que es el dispositivo que se encarga de proporcionar una realimentación de la posición al controlador.

Se observan algunas señales de entradas y salidas digitales al controlador como la señal de habilitar el dispositivo (RF) que tiene un trabajo conjunto con la señal de paro del motor o Halt (AH') las cuales son controladas por el PLC mediante la señal Enable. Un aspecto importante en el controlador es el contacto Bb el cual se cierra una vez el dispositivo halla inicializado, se encuentre sin errores y esté listo

para que se le aplique el voltaje de potencia, el voltaje de potencia no puede ser administrado al dispositivo sin que éste haya realizado la prueba inicial del sistema, por este motivo se cableó la señal Potencia Indramat manejada por el PLC en serie con el contacto Bb.

Del puerto X3 se utilizan las señales Ready que se pone en alto una vez el dispositivo halla sido inicializado, halla potencia en el puerto X5 y no tenga errores. La señal E-Stop' se cablea al circuito de control de paro de emergencia y la señal Ref se utiliza para cuando se requiere dar una referencia (posición cero) al servocontrolador de la posición del motor.

En cuanto a la conexión del puerto de comunicaciones, ésta se puede ver en la figura 5.3 de la sección Interfaz RS-232.

Las conexiones hechas en los controladores BA Intellidrive se pueden observar en la figura 5.16. Estos controladores se alimentan con 110VCA, se instaló un breaker de 10A (según recomendación del fabricante [1]) para proteger el dispositivo. Es recomendable colocar un filtro de línea en la entrada de potencia para minimizar las emisiones de interferencia electromagnética EMI.

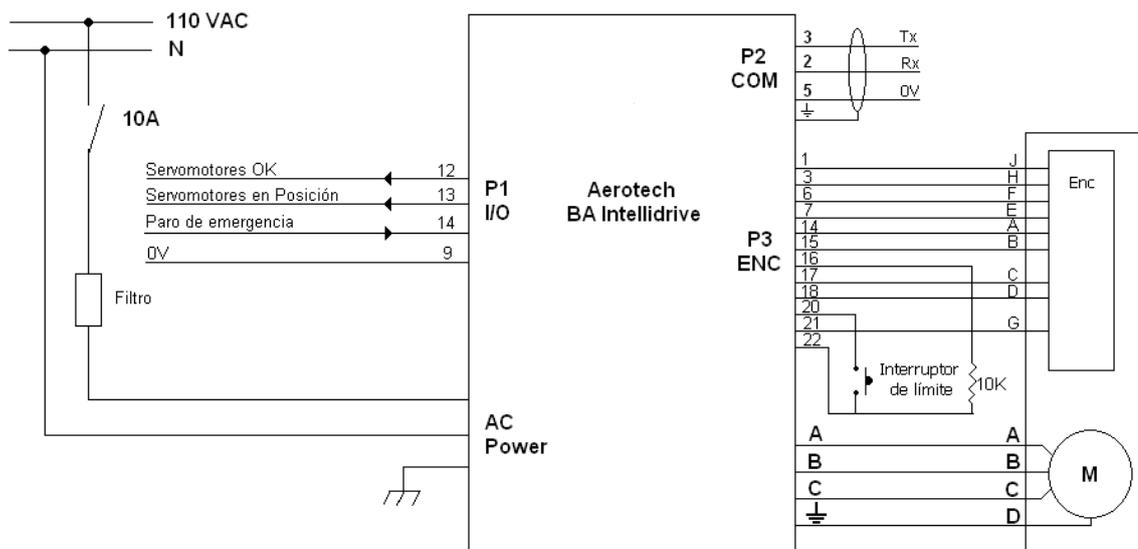


Figura 5.16 Diagrama eléctrico de conexiones del controlador BA Intellidrive.

De igual forma, el encoder del motor permite al controlador tener la realimentación de la posición del eje del motor, éste se conectó como se muestra en la figura 5.16 al puerto P3. Los servocontroladores BA Intellidrive tienen una alimentación monofásica de la cual se genera un voltaje trifásico para manejar los motores.

En cuanto a la comunicación serial, ésta se cableó en todos los dispositivos en una configuración de anillo o daisy chain como se explica en la sección Interfaz RS-232. Existe una entrada al controlador que se encarga del paro de emergencia y dos salidas que van al PLC como se explica en la sección de entradas digitales.

5.2.8 Servomotores

Los servomotores son elementos que tienen una gran importancia en el sistema de control de la máquina. Éstos junto con los servocontroladores tienen la función de desplazar la estructura que está acoplada a su eje en este caso una distancia lineal, y en ellos reside la precisión que se requiere para posicionar los agujeros en la lámina de material. Se destacan dos tipos distintos de servomotores en la máquina.

El motor que arrastra la lámina tiene acoplado a su eje un rodillo, el cual hace la transferencia mecánica de movimiento rotacional a lineal (esta relación debe ser programada en el controlador). Este motor es de la marca Rexroth Indramat modelo MKD 112B-024-GG0-AN con 13.8 KW de potencia y 42 Nm de torque.

Los motores que mueven las estructuras en donde se encuentran los pistones hidráulicos y también las mesas guía son de la marca Aerotech BM 500 de 1.5KW. Estos motores tienen acoplado a su eje un tornillo sin fin, el cual hace la transferencia mecánica de movimiento rotacional a lineal.

En la figura 5.17 se pueden ver los servomotores utilizados en la máquina, a la izquierda el servomotor Rexroth Indramat.



Figura 5.17 Servomotores utilizados.

5.2.9 Interruptores de límite

En este punto se mencionan brevemente los interruptores de límite para destacar la diferencia del empleo de estos en el sistema.

Un interruptor de límite se utiliza para verificar la posición del rodillo de arrastre e indica al sistema si la lámina se encuentra prensada entre los rodillos o no, este interruptor se cablea al módulo de entradas digitales del PLC, como se ve en la figura 5.9.

Los otros interruptores de límite se encuentran ubicados en partes no móviles de la máquina, uno por motor (en total 13) y se encargan de dar referencia a los controladores de cuando las estructuras móviles alcanzan la posición cero, estos interruptores son necesarios para calibrar la máquina para que las mediciones de todos los desplazamientos sean referenciadas a esos puntos. Contrariamente, éstos interruptores están cableados directamente a los servocontroladores BA Intellidrive con una resistencia de pull up como se muestra en la figura 5.16 y no al PLC como el interruptor de estado del rodillo.

5.2.10 Sensores de posición LVDT

Los sensores de posición utilizados en la máquina son del tipo LVDT (Linear Voltage Position Transducer) marca Balluff, modelo BTL5-A21-MM0050-B-532. Estos sensores están colocados de manera que la barra que tienen estos para medir la posición está dentro de los cilindros hidráulicos de la máquina y miden la posición en que se encuentra cada uno de los 10 pistones que accionan los troqueles y la guillotina.

Estos transductores son los encargados de dar una realimentación de la posición de cada pistón al sistema y son esenciales para el control automático en lazo cerrado de la velocidad de perforación de los troqueles.

Los transductores tienen una salida analógica de 0 a 10VDC proporcional a la posición de la barra que tiene una longitud máxima de 50mm, éstos son alimentados por una tensión directa de $\pm 15\text{VCD}$ y se conectaron al módulo de entradas analógicas del PLC como se indica en la tabla 5.3 y en la figura 5.18.

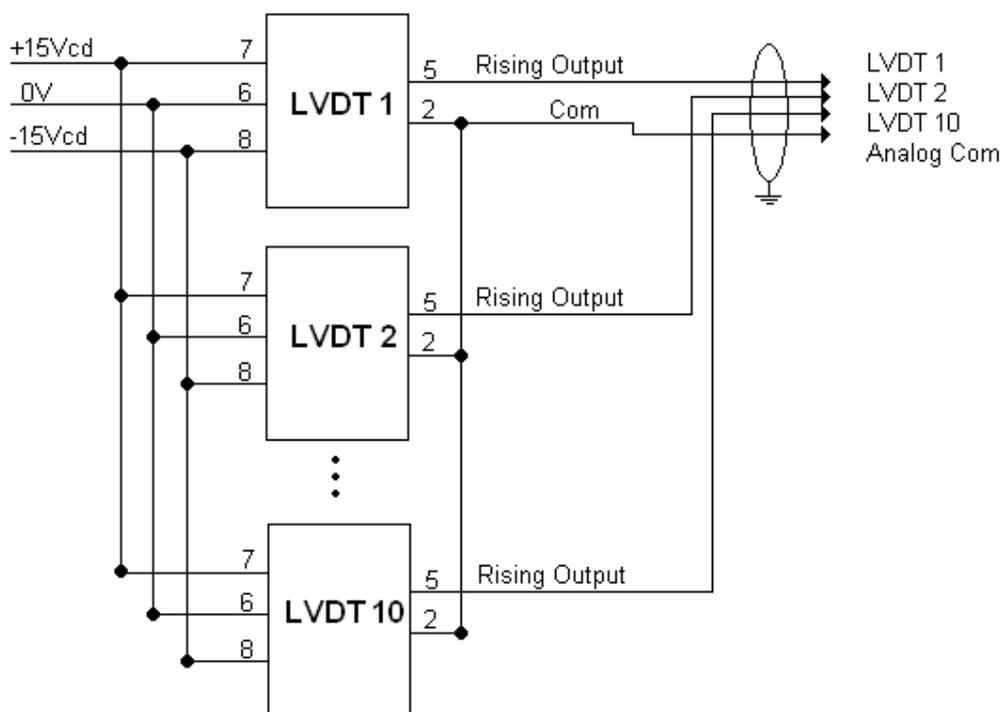


Figura 5.18 Conexión de transductores de posición lineal.

5.2.11 Electroválvulas proporcionales

Los actuadores del sistema de control de pistones hidráulicos son las electroválvulas proporcionales MOOG-D661-1962E. Éstas son de 4 vías y su posición es proporcional al voltaje de control aplicado de -10 a 10VCD por ejemplo, aplicando un voltaje máximo positivo al amplificador de control de la válvula, ésta se abre al 100% (P→A y B→T), la acción es de forma inversa para voltajes negativos y si se aplica una tensión de 0V la válvula se posiciona en el centro cortando el fluido del aceite en cualquier dirección. De esta forma, se puede controlar el flujo y el caudal del fluido que acciona cada pistón, y de esta manera la velocidad del troquel. “La presión del fluido determina la fuerza de empuje de un cilindro, el caudal de ese fluido es quien establece la velocidad de desplazamiento del mismo” [13].

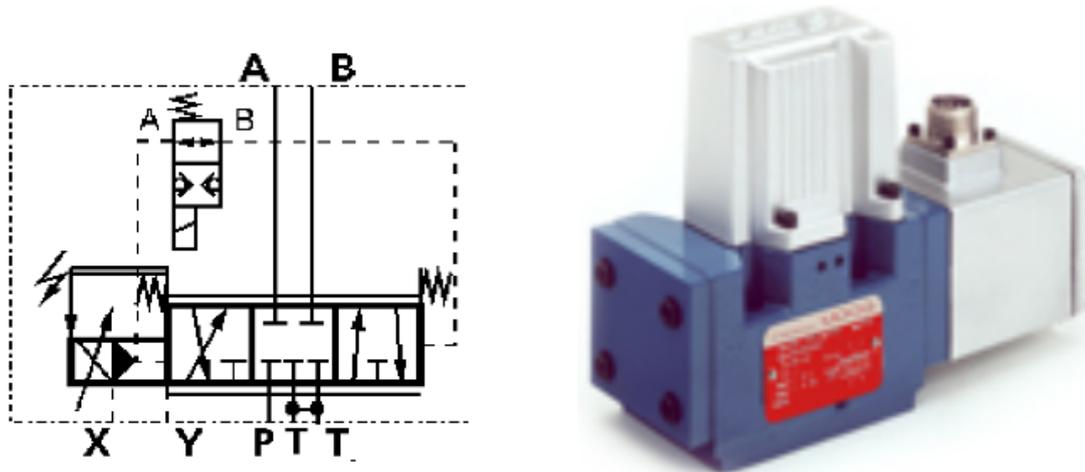


Figura 5.19 Electroválvula proporcional utilizada [13].

Estas válvulas operan a una presión máxima de 5000 PSI, son alimentadas con ± 15 VCD y tienen una respuesta al escalón (de 0 a 100%) de 18-28ms si opera a 3000 PSI.

Las electroválvulas proporcionales se conectaron a los módulos de salidas analógicas como se observa en las tablas 5.4, 5.5, 5.6 y en la figura 5.20.

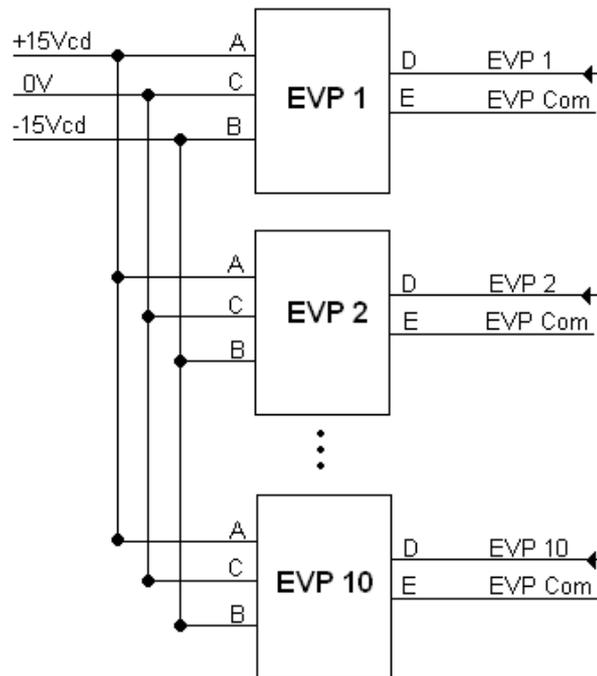


Figura 5.20 Conexión de electroválvulas proporcionales.

5.2.12 Electroválvulas de dos estados

En la máquina troqueladora se distingue una electroválvula neumática que se encarga de subir o bajar el rodillo de arrastre. Esta válvula tiene 3 vías, dos posiciones y dos solenoides accionados a 110VCA.

En la figura 5.11 se muestra la conexión de esta electroválvula al módulo de salidas de relés del PLC, activando un solenoide se sube el rodillo y activando el otro solenoide se logra bajar el rodillo y prensar la lámina.

Es importante destacar que la tensión con la que se energizan los solenoides de esta válvula proviene del circuito de paro de emergencia, de esta manera ante cualquier paro de este tipo, la energía eléctrica que acciona la válvula es cortada.

5.2.13 Control de paro de emergencia

En una máquina en donde se tienen motores, pistones neumáticos e hidráulicos, y maquinaria pesada en movimiento que es operada y supervisada por personas, se hace necesario contar con un circuito que detenga por completo el funcionamiento de la máquina en caso de emergencia.

Por razones de seguridad se implementó un circuito que permite detener el funcionamiento de las partes móviles de la máquina. Para esto se utilizó el

dispositivo supervisor de paros de emergencia y puertas protectoras PNOZ X3 el cual cumple los requisitos de las normas de seguridad EN 60204-1 e IEC 60204-1. Este dispositivo cuenta con 3 contactos de seguridad, uno auxiliar y uno de salida por semiconductor. En la figura 5.21 se puede observar un diagrama de bloques del dispositivo.

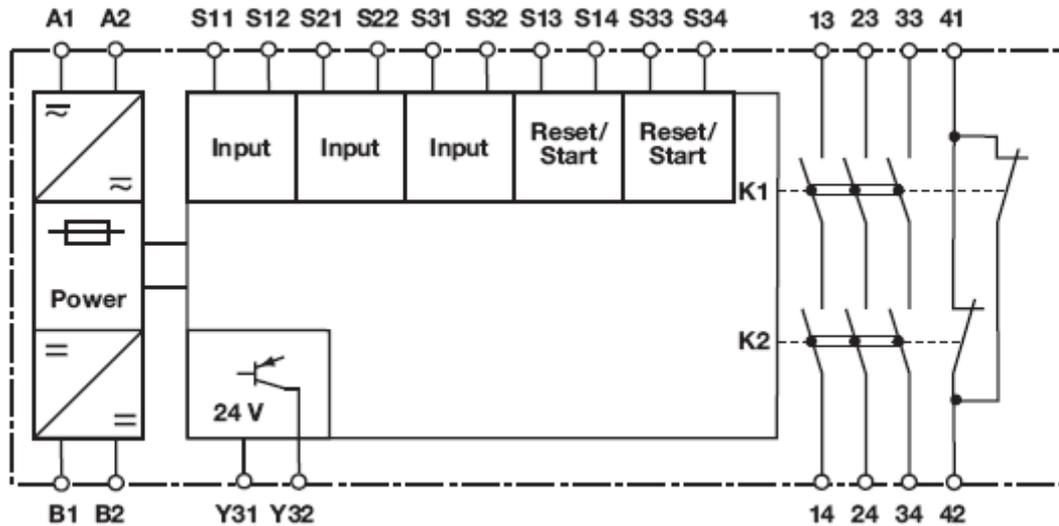


Figura 5.21 Diagrama de bloques del dispositivo supervisor de paros de emergencia PNOZ X3.

A la entrada de este dispositivo se conectan varios interruptores en serie. Estos interruptores son normalmente cerrados y están distribuidos en la máquina troqueladora y serán distribuidos además, a lo largo de toda la línea de producción esto para que existan múltiples puntos de donde producir un paro de emergencia. Estos interruptores se conectan también en puntos de riesgo máximo como en las puertas de seguridad de la máquina.

Cuando se enciende por primera vez la máquina o después de haberse dado una señal de paro, el dispositivo deshabilita los contactos de seguridad hasta que éste sea rehabilitado por el usuario (se accione el botón de reset). Cada vez que hay un ciclo de conexión/desconexión se comprueba automáticamente si los relés del dispositivo de seguridad abren y cierran correctamente. También se detectan defectos en el circuito de entrada (interruptores) al sistema.

En la figura 5.22 se observa el diagrama eléctrico de conexión de este bloque.

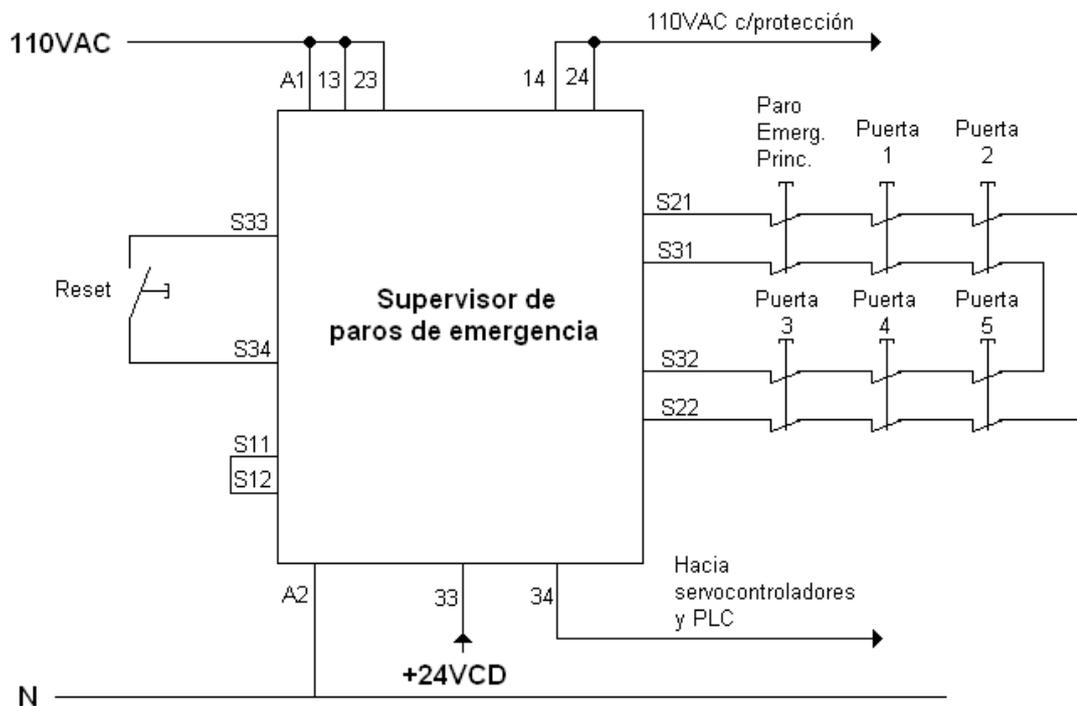


Figura 5.22 Diagrama eléctrico de conexión del dispositivo supervisor de paros de emergencia.

5.3 Descripción del software

Para la implementación de este proyecto fue necesario programar tres distintos bloques de hardware, utilizando para esto tres lenguajes de programación diferentes y varios paquetes de software para el diseño. En el siguiente apartado se explica en detalle el diseño del software que se desarrolló para enlazar primeramente, cada uno de los bloques y que permitió al final controlar la máquina troqueladora de la empresa.

5.3.1 Módulo de comunicaciones 1746-BAS

Como se explicó en la sección de Descripción de hardware, el módulo de comunicaciones 1746-BAS es un elemento independiente el cual tiene su propio CPU, memoria y periféricos, que se conecta al chasis del PLC y puede comunicarse con éste para fines de expandir la capacidad de puertos de comunicación del sistema.

Antes de poder utilizar este módulo fue necesario configurarlo y programarlo de acuerdo a las necesidades del proyecto. El módulo se programa en lenguaje BASIC enviándole comandos a través de uno de sus puertos (PRT 1 RS-232, se deben configurar jumpers en el módulo), se debe utilizar una terminal ASCII para

el manejo de puertos RS-232, de esta manera se utilizó la Terminal Hercules Setup Utility version 3.1.0 como se ve en la figura 5.23.

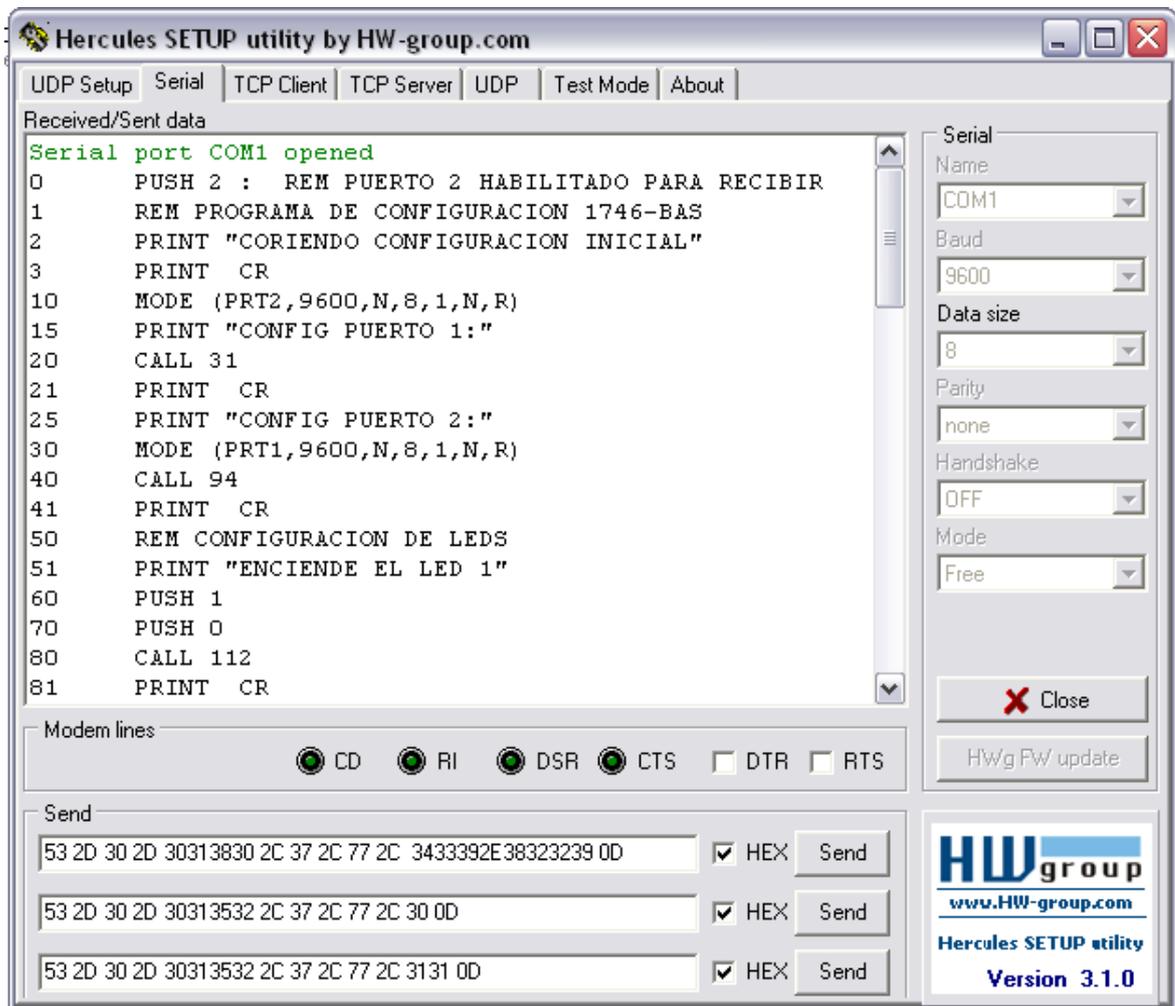


Figura 5.23 Terminal para manejo de puertos RS-232 y parte del programa de configuración para el módulo 1746-BAS.

Los puertos fueron configurados para que utilizaran ambos el estándar RS-232, 9600 baudios, sin paridad y un bit de parada. Esta misma configuración es la que soportan los controladores de los servomotores utilizados. La velocidad transmisión es la recomendada por fabricantes para tener una tasa de comunicación suficiente y minimizar los errores en ésta.

En el sitio en Internet de literatura de Allen Bradley [2] está publicado un documento acerca de la programación en BASIC para este módulo.

El módulo se comunica con el PLC por medio de tablas imagen de datos de entrada y salida. Éstas se encuentran en el módulo y se pueden acceder con el PLC, las tablas tienen una longitud de 64 palabras cada una, la M0 es de salida y la M1 es de entrada de datos como se puede ver en la figura 5.24.

En la tabla M0 es en donde se debe escribir las palabras (de 16 bits) que se requiera enviar al módulo por alguno de sus puertos y en la tabla M1 es en donde se recibe la información que ingresa al módulo.

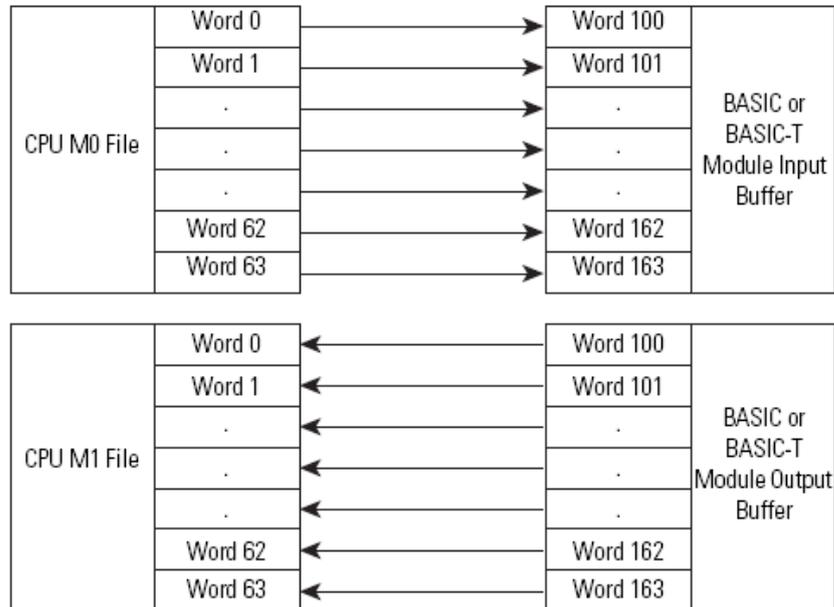


Figura 5.24 Transferencia de archivos entre el PLC y tablas de datos imagen M0 y M1.

Una palabra de control en el módulo es la encargada de iniciar y notificar de las comunicaciones de transmisión y recepción de datos. En las figuras 5.25 y 5.26 se muestra el diagrama de flujo de los algoritmos de transmisión y recepción de datos por serie mediante los puertos del módulo 1746-BAS.

En el algoritmo de transmisión se copia el dato a transmitir con el número de palabras que este tiene en el primer byte, se activa la bandera para transmitir ya sea por el puerto PRT1 o PRT2 y se espera a que la bandera de estado se ponga en alto lo que garantiza una transmisión exitosa, cuando esta bandera permanece en bajo se notifica a otro bloque de software que el puerto está transmitiendo, se inicia un temporizador y si la transmisión no se ha llevado a cabo cuando se termina el tiempo, se intenta de nuevo la transmisión hasta tres veces más antes de enviar un mensaje que indique al usuario que hay un problema con el módulo.

El algoritmo de recepción está siempre escuchando por una posible recepción, cuando hay alguna recepción, se identifica primero por cual puerto se dio y se copian los datos de la tabla imagen hacia un archivo en el PLC para respaldarlos, la bandera de recepción de datos se debe borrar para ser utilizada en una futura recepción, y se pone en alto una bandera que indica a otro bloque de código que se ha producido una recepción para que éste identifique la cadena recibida y tome acciones con respecto a ésta.

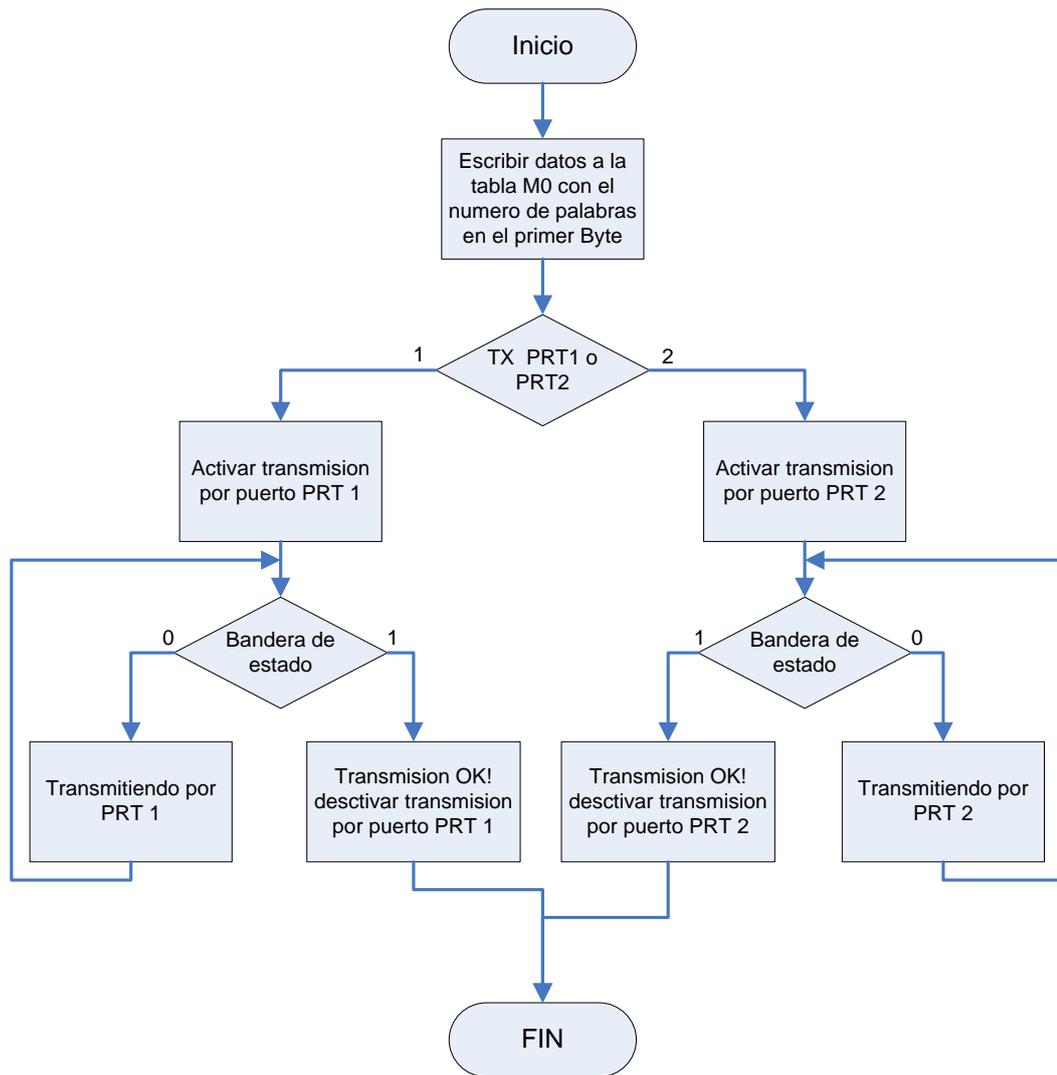


Figura 5.25 Algoritmo de transmisión de datos serie por los puertos del módulo 1746-BAS.

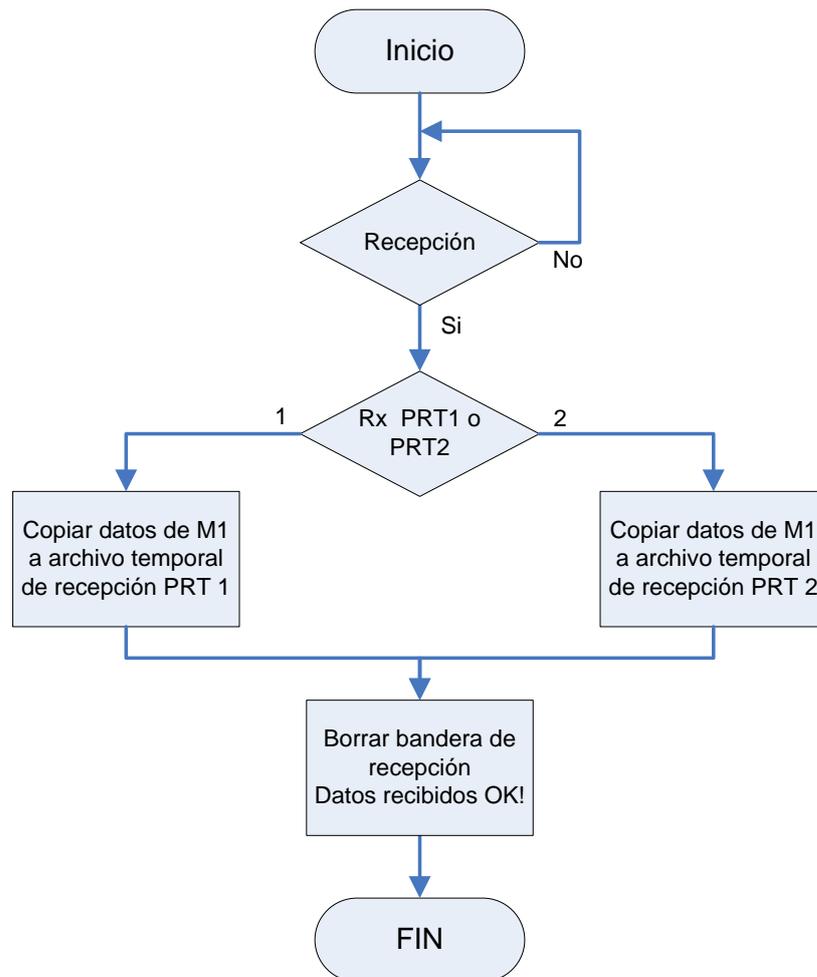


Figura 5.26 Algoritmo de recepción de datos serie por los puertos del módulo 1746-BAS.

De esta manera, el PLC queda enlazado al módulo 1746-BAS para las comunicaciones serie por dos puertos diferentes para el control de los dos tipos de servocontroladores.

5.3.2 PLC

El PLC es el dispositivo que se encarga de controlar todos los componentes de la máquina y la programación de éste es el elemento que le da vida al sistema final. Para programar el PLC se utilizó el software de diseño RSLogix 500 el cual permite de manera gráfica (programación en diagrama de escalera) generar el programa encargado de monitorear el estado de dispositivos y gobernar los actuadores de la máquina.

La programación del PLC fue dividida en secciones que se programaron independientemente y luego se fueron enlazando hasta llegar a conformar el software final. Una característica importante del tipo de programación en escalera es que permite el diseño modular así, se pueden programar bloques de código

independientemente, y se pueden agregar nuevos bloques cuando se requiera sin que esto afecte a los módulos de software existentes, esto permite una gran flexibilidad del sistema por ejemplo, un operario podría estar cargando una nueva bobina de material en el sector de alimentación de la línea mientras la máquina troqueladora está corriendo una receta de troquelado independientemente, esto utilizando un solo PLC programado de manera modular. A continuación se explican los distintos bloques de código que se diseñaron en este proyecto.

Lista de comandos

Los controladores de servomotores son comandados vía RS-232 por protocolo ASCII, cada controlador tiene un arreglo de instrucciones y comandos que son utilizados para parametrizar, controlar y diagnosticar el dispositivo. Estos comandos son propios de cada tipo de controlador y tienen su protocolo específico el cual se debe seguir para que la unidad acepte el comando.

Como se observa en la figura 5.25, el algoritmo de transmisión de datos serie por el módulo de comunicación 1746-BAS requiere que la palabra a enviar sea copiada en el bloque de memoria M0 y que en el primer byte se envíe el número de palabras a transmitir. Este requerimiento del módulo junto con la configuración de los comandos de los controladores se acondicionan en una trama para el control de estos dispositivos. A continuación se puede observar las tramas diseñadas para los dos distintos controladores.

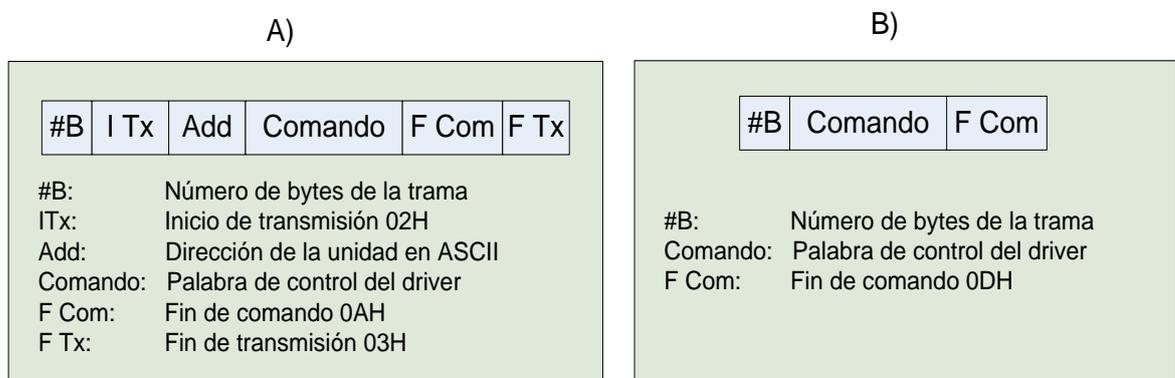


Figura 5.27 Trama de datos para el envío de comandos a los servocontroladores. A) Controlador BAI, B) Controlador INDRAMAT.

Se puede notar de la figura 5.27 que la trama de los controladores BA Intellidrive lleva más elementos que la del otro tipo de controlador. Esto es debido a que los controladores BAI están conectados en configuración de anillo (Daisy chain) y por este motivo, las palabras que se transmitan a estos deberán llevar la dirección del dispositivo (máximo 42 dispositivos), esto no es necesario en el controlador Indramat ya que éste se comanda independientemente por otro puerto del módulo de comunicaciones.

En la tabla 5.7 se pueden ver algunos de los comandos más utilizados en los dos controladores. A esos comandos se les debe agregar los demás elementos de la

trama para poder transmitirlos al dispositivo, por este motivo se requirió programar las palabras de todos los comandos a utilizar en un archivo de datos del PLC, de esta manera, el algoritmo de envío de comandos solamente debe copiar el comando que se requiere enviar de la tabla de comandos hacia el bloque de memoria M0 del módulo 1746-BAS y hacer la transmisión, como se explica a continuación.

Tabla 5.7 Ejemplo de algunos comandos de control utilizados.

Comando	Función	Controlador
IIN 1000	Ir a posición absoluta 1000 mm	BA Intellidrive
IHO	Ir a Home	BA Intellidrive
PS	Lee palabra de estado del controlador	BA Intellidrive
S-0-0180,7,w,439	Escribe desplazamiento lineal de 439 mm	INDRAMAT
S-0-0152,7,w,11	Inicia el movimiento del eje	INDRAMAT
S-0-0336,7,r	Lee palabra de estado del controlador	INDRAMAT

Algoritmo de envío de comandos

Cuando ya se cuenta con una tabla en donde los distintos comandos están ubicados e identificados, un algoritmo se encarga de enviar el comando y asegurarse de que el controlador lo acepte. En la figura 5.28 se puede ver el diagrama de flujo de este proceso.

Este algoritmo se encuentra siempre a la espera de la orden de enviar un comando. Cuando se requiere enviar un comando se indica cuál es y el puerto por el cual se debe enviar, de esta manera se empieza el proceso.

Así, el bloque de software copia el comando indicado (toda la trama) a la memoria M0 del módulo de comunicaciones y activa la transmisión de datos como se explicó en la sección anterior en la figura 5.25, en ese mismo instante se activa un temporizador que va a dar un periodo de tiempo para que realice la transmisión, luego de transcurrido ese tiempo se chequea que el comando se halla enviado correctamente por el módulo, si no es así se reintenta la transmisión un total de tres veces antes de enviar un mensaje al usuario de que existe un problema con el módulo de comunicaciones.

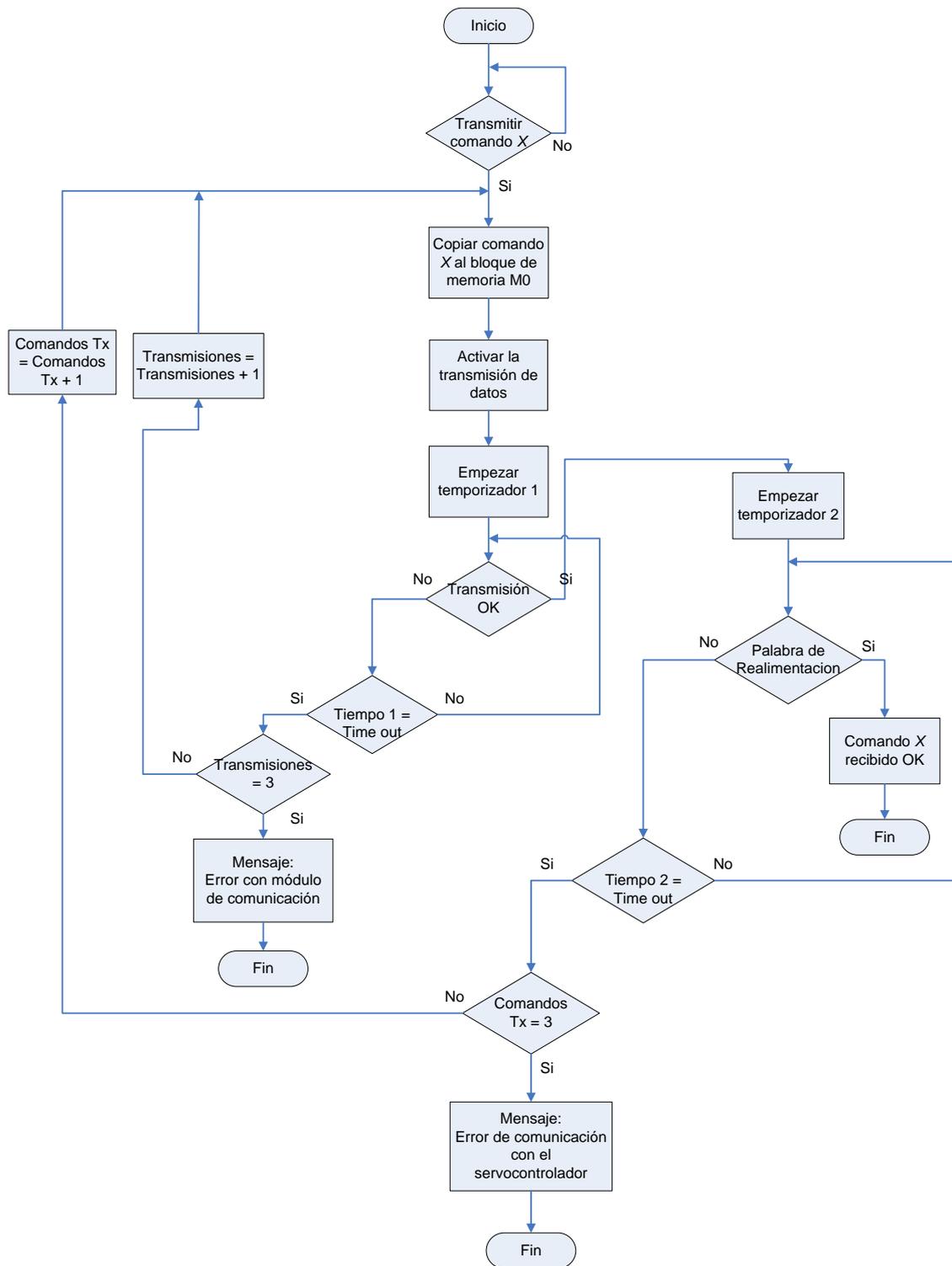


Figura 5.28 Algoritmo de envío de comandos a los servocontroladores.

Cuando el módulo ha enviado correctamente el comando, se activa otro temporizador que chequea si el controlador lo recibió y procesó adecuadamente, de igual forma se da un tiempo para que el servocontrolador procese la información y devuelva una palabra de realimentación. Esta palabra de

realimentación es diferente para cada controlador (06H para el controlador BAI y el signo “#” ASCII en el Indramat) e indica si el comando se ejecutó correctamente, si es así una bandera con el nombre “Comando X OK” indica que el comando fue enviado y ejecutado de forma correcta, si no se reintentará enviar el comando hasta tres veces antes de comunicar al usuario de que existe un error con el servocontrolador.

Cuando se da un error ya sea en el controlador o en el módulo, el sistema de automatización de troquelado se detiene para no ocasionar errores en el producto y desperdicio de material. En el HMI se despliega el mensaje de error indicando al operario de la máquina el proceso a seguir para corregir el error, en este caso se deben revisar conexiones de potencia y comunicación en los servocontroladores, además de diagnosticarlos con una computadora por si alguno de éstos tuviera un error interno, si el error estuviera presente en el módulo se deberá revisar independientemente. Estos tipos de errores son los más críticos del sistema los cuales detienen por completo el proceso y requieren revisión técnica, aunque es muy poco probable que se den, el sistema debe ser capaz de detectarlos principalmente para ayudar al equipo técnico que se encargará de la reparación.

Control manual de servomotores

Este módulo se encarga del movimiento independiente de los motores de la máquina. El bloque se encarga de leer un archivo en el que se encuentra la distancia en milímetros que se debe mover un determinado motor para ser enviado en un comando de movimiento al controlador. Este algoritmo puede ser utilizado por el usuario para realizar movimientos manuales de las estructuras en donde se encuentran los troqueles y también es utilizado por otros bloques de software para el manejo automático.

La importancia de este bloque radica primordialmente en el uso automático del sistema ya que en que éste código es llamado por otro módulo cada vez que se necesita mover algún motor ya sea en la posición x o y de la máquina. Este módulo es un pilar fundamental en la jerarquía del software total del sistema.

Los movimientos en la dirección de y se hacen de forma absoluta, o sea se indica al controlador que mueva el motor hasta un punto indicado y el controlador determina el punto donde se encuentra el motor actualmente y lo envía a mover la diferencia de distancia hasta alcanzar el punto. El motor de arrastre tiene un comportamiento diferente, éste realiza movimientos relativos únicamente en un sentido de giro, o sea a este se le indica la distancia que se debe mover relativa a la posición actual. Este comportamiento se configuró previamente en cada controlador.

La distancia a mover cualquiera de los motores se encuentra en un archivo tipo entero (integer) de 16 bits expresada en milímetros (este es el tipo de archivo que soporta el HMI), el algoritmo debe leer el archivo entero y transformarlo a una cadena de caracteres ASCII para introducirlo en el comando a enviar junto con el

resto de la trama y por último enviar el comando al controlador requerido llamando al algoritmo de envío de comandos.

Antes de enviar cualquier comando es necesario actualizar el valor de la dirección del dispositivo (en el caso de controladores BAI) en la trama. Así, se puede resumir que este bloque tiene como entradas: el valor de la distancia a mover el motor, el tipo de controlador utilizado y la dirección del controlador.

En el caso del controlador Indramat, se debe enviar luego de la distancia a mover un comando para iniciar el movimiento y otro para terminarlo, de esto se encarga también este algoritmo.

Configuración de canales analógicos

Como se explicó en la sección 5.2.3, los canales analógicos necesitan ser configurados antes de ser utilizados. Para esto, los módulos cuentan con palabras de configuración las cuales deben ser establecidas según las necesidades de la aplicación.

En la figura 5.29 se muestra la palabra de configuración para las entradas analógicas la cual se estableció como 1011000001110111 para utilizar 10 canales de entrada, entrada de 0 a 10Vdc escalada para PID y filtro de 40Hz.

Para las salidas analógicas no se necesitó configurar el módulo, sino que simplemente se tomó en consideración que existe una palabra imagen de salida que varía de -32768 a 32767 (decimal) para obtener un voltaje de salida de -10 a 10 Vdc proporcionalmente.

Las entradas y salidas analógicas de este sistema están configuradas para un control automático de posición y velocidad, por este motivo se tuvieron que adecuar para ser correctamente utilizadas por el módulo de programación de control PID que facilita el PLC. El módulo de control de PID trabaja con palabras entre el rango de 0 a 16383 (decimal), siendo 0 el mínimo valor de la entrada y 16383 el máximo, igualmente las salidas que maneja varían en este rango, por este motivo fue que se seleccionó escalar las entradas a PID en la palabra de configuración.

En las salidas analógicas el escalado a PID se tuvo que hacer con instrucciones matemáticas del PLC, así 0 corresponde a -32768 y 16363 corresponde a 32767, de esta manera el bloque del PID puede funcionar correctamente para el accionamiento de las electroválvulas proporcionales de la máquina.

Channel Configuration Word

Define	To Select	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Class 1 Data or Status Configuration	Read Data for Channel 0 to 7															0	0
	Read Data for Channel 8 to 15															0	1
	Read Status for Channel 0 to 7															1	0
	Read Status for Channel 8 to 15															1	1
Class 1 Handshaking	To Reset Status Bit 6														0		
	Transmit Channel Configuration														1		
Reserved	Not Used													X			
Input Type	+/- 10 Vdc or +/- 20 ma											0	0				
	1 to 5 Vdc or 4 to 20 ma											0	1				
	0 to 5 Vdc or 0 to 1 ma											1	0				
	0 to 10 Vdc or 0 to 20 ma											1	1				
Data Format	Engineering Units								0	0	0						
	Scaled-for-PID								0	0	1						
	Proportional Counts								0	1	0						
	1746-NI4 Data Format								0	1	1						
	User Limit Range 0 (Class 3 Only)								1	0	0						
	User Limit Range 1 (Class 3 Only)								1	0	1						
	User Limit Range 2 (Class 3 Only)								1	1	0						
	User Limit Range 3 (Class 3 Only)								1	1	1						
Calibration Channel needs to be disabled to perform calibration	Normal RUN Mode (Exit Calibration Mode)					0	0	0									
	Enter Calibration Mode					0	0	1									
	Perform Zero Calibration					0	1	1									
	Perform Full Scale Calibration					1	0	1									
Filter Frequency Filter frequencies are set in ch 0, 4, 8 and 12 for that channel and the following 3 channels in that group. Filter groupings are: (0 to 3) (4 to 7) (8 to 11) and (12 to 15)	6 Hz		0	0	0												
	10 Hz		0	0	1												
	20 Hz		0	1	0												
	40 Hz		0	1	1												
	60 Hz		1	0	0												
	80 Hz		1	0	1												
	100 Hz		1	1	0												
	250 Hz		1	1	1												
Channel Enable	Channel Disabled	0															
	Channel Enabled	1															

Figura 5.29 Palabra de configuración del módulo de entradas analógicas [14].

Algoritmo de control de pistones

Para controlar el golpe de los pistones en la lámina de hierro como se discutió en la sección 3.1 (figura 3.8) fue necesario implementar un algoritmo de comparación y un bloque de control Proporcional Integral Derivativo o PID.

Cada pistón tiene un identificador (P1, P2 ... PC) como se muestra en la figura 3.5, el cual se utiliza para el accionamiento del troquel. En la figura 5.30 se muestra un diagrama de flujo del algoritmo que maneja el troquelado.

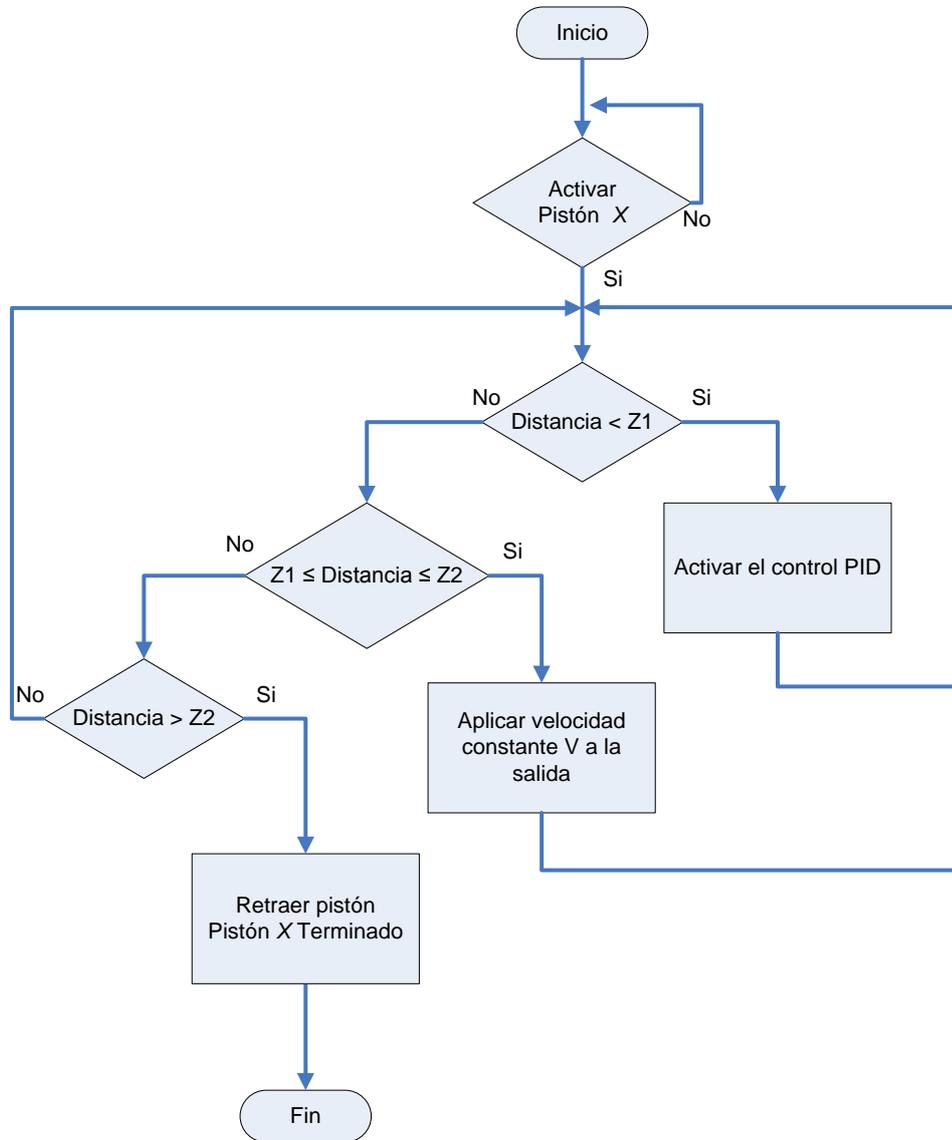


Figura 5.30 Algoritmo de control de golpe de troqueles.

El algoritmo comienza cuando se envía la señal “Activar Pistón X”, se hacen aquí una serie de comparaciones para determinar la posición del troquel y se toman diferentes acciones según la distancia en donde se encuentre éste.

La velocidad de aproximación del troquel a la lámina va a ser determinada por el algoritmo PID de control de posición, éste garantiza que la velocidad sea la más rápida minimizando el sobreimpulso en el punto Z1. Cuando el troquel llega a la distancia Z1 el control PID se desactiva y se aplica una velocidad constante al pistón (un voltaje constante en la entrada del actuados) hasta que el troquel llega

al punto Z2, en este punto se procede a retraer el pistón igualmente, con una velocidad constante pero mucho más rápida que la de perforación.

El algoritmo PID se programó haciendo uso de la ecuación de diferencias diseñada (Ecuación 3.7) con las constantes respectivas K_P , K_D y K_I ; se configuró el periodo de muestreo a 20ms y se introdujo el punto Z1 como Setpoint.

Programación de recetas

El sistema implementado brinda al usuario la opción de programar recetas. Se pueden programar hasta diez distintas recetas de troquelado las cuales están organizadas en archivos de datos en el PLC.

El usuario programa las recetas por agujeros y cada receta guarda hasta 80 agujeros, luego cuando se va a correr la receta se hace agujero por agujero como se explica más adelante. Cada receta está organizada como se muestra en la figura 5.31, en tres variables consecutivas se guarda la posición en x, en y, y el pistón que se debe activar para hacer el agujero, teniendo en cuenta que la posición en x es relativa y en y es absoluta. El algoritmo utiliza el identificador del pistón para determinar la dirección del controlador al cual se le deben enviar los comandos (solo para movimientos en y).

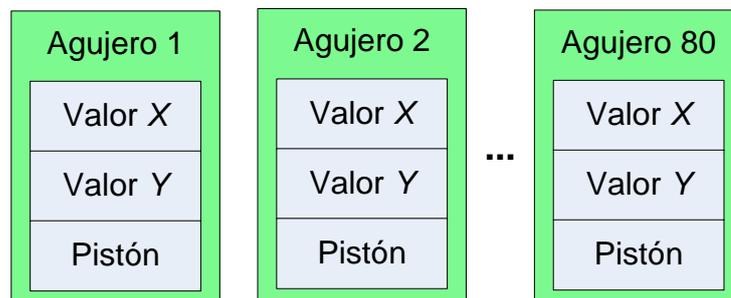


Figura 5.31 Organización de recetas en el archivo de datos del PLC.

El algoritmo que se encarga de programar las recetas se comunica con el HMI para llevar a cabo este procedimiento. El usuario va ingresando agujeros con su respectivo posicionamiento en la lámina y con el troquel específico que se requiere, hasta llegar al punto donde se debe hacer el corte del producto lo cual se programa como otro agujero pero utilizando la guillotina en lugar de troquel.

En la figura 5.32 se observa la organización de distintos bloques de este algoritmo y el flujo de datos entre estos. Cuando se programa una receta se hace en un archivo temporal y cuando el usuario termina de editar todos los parámetros requeridos por la receta, ésta se guarda en un campo determinado, así el módulo que corre la receta siempre la va a leer del archivo temporal y el usuario especifica cual receta cargar.

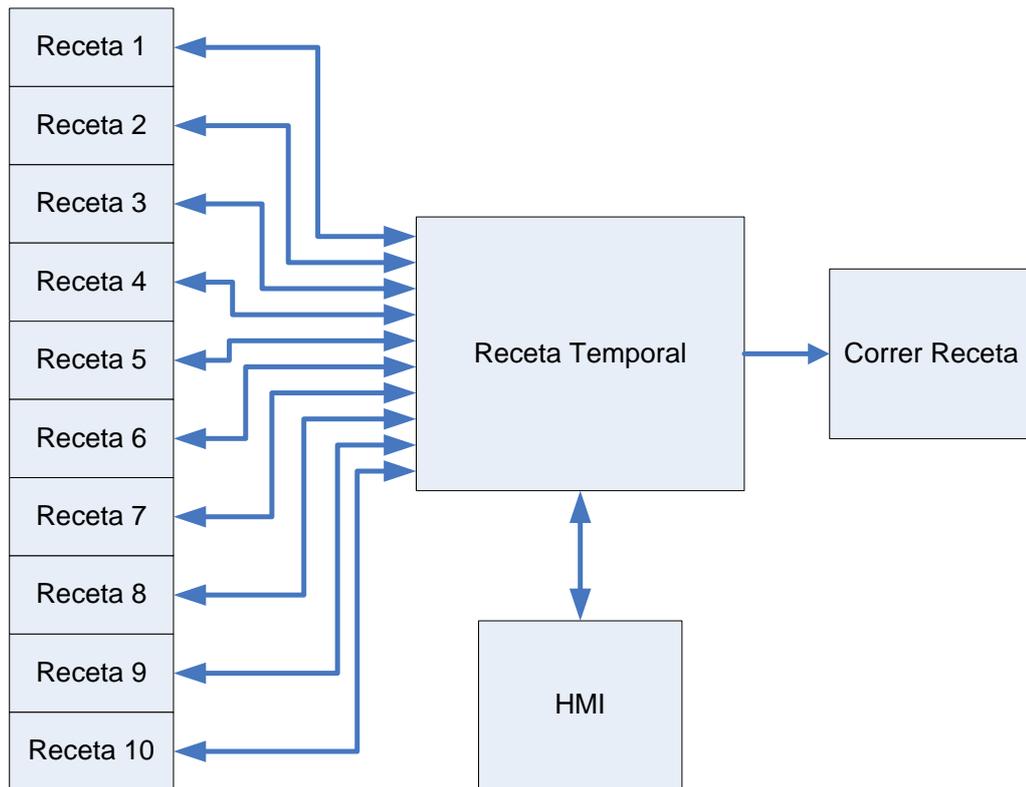


Figura 5.32 Diagrama de bloques de software de la organización de recetas en el sistema.

Las limitaciones en cuanto a recetas y número de agujeros por receta fueron discutidas con el ingeniero de planta de la empresa y se llegó al acuerdo de hacerlo de esa manera, sin descartar la posibilidad de que en un futuro se puedan ampliar.

Algoritmo encargado de correr receta

Este es el bloque de software que se encarga del funcionamiento automático de la máquina troqueladora y es el que tiene el nivel jerárquico mayor. Este bloque llama al algoritmo del Control manual de servomotores y al de Control de pistones, tantas veces como se indica en la receta que se está corriendo.

El procedimiento que sigue el algoritmo para correr recetas se puede ver en la figura 5.33. Cuando el usuario selecciona alguna receta e inicia el proceso, el algoritmo carga la receta escogida en el archivo temporal del cual irá leyendo agujero por agujero para ejecutar los movimientos de motores y el accionamiento de pistones.

El algoritmo está programado utilizando el direccionamiento indexado del PLC. Así, el registro índice es número del agujero y se utiliza para copiar los datos del registro temporal a los bloques de Control manual de motores y Control de pistones, el número del agujero se va incrementando conforme se van ejecutando las perforaciones y se reinicia cada vez que hay un corte del material.

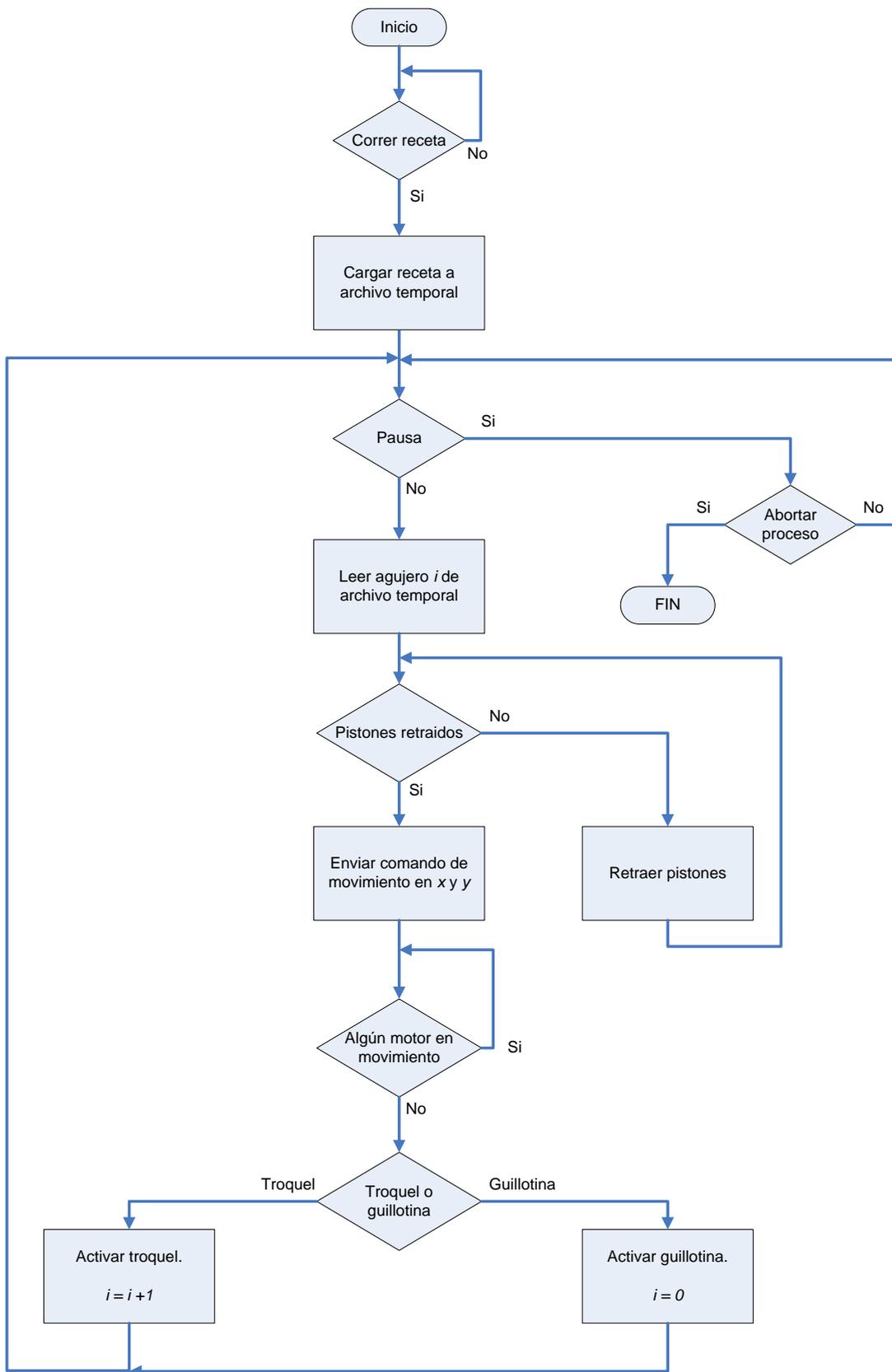


Figura 5.33 Diagrama de flujo del algoritmo encargado de correr recetas.

El algoritmo lee los datos del primer agujero, a saber: posición x, posición y, e identificador de pistón (del cual se obtiene la dirección del servomotor “y” a mover); los copia a los bloques de código para la ejecución de movimientos de motores y control de pistones. Luego chequea que los pistones estén retraídos (de no ser así los retrae) y activa el movimiento de los motores, en este punto se monitorea la señal de los controladores que indica si alguno de los motores se encuentra en movimiento y se espera a que todos estén inmóviles antes de accionar el pistón indicado.

Al accionar los pistones el sistema identifica si se debe accionar un troquel o la guillotina. Si se activa algún troquel, se corre el algoritmo de control de pistones con el troquel específico –en este bloque se encuentran configurados los valores de Z1, Z2 y velocidad de perforación– y se incrementa el registro índice que corresponde al número de agujero, de esta manera se repite el proceso, se cargan los nuevos valores del agujero siguiente y así sucesivamente hasta que se identifique que se debe accionar la guillotina, en este punto se le hace un corte a la lámina, se termina de esta forma un ciclo de troquelado y se obtiene un producto listo para enviar a la sección de formado de la línea de producción (la guillotina presenta el mismo control automático de accionamiento igual al resto de pistones).

Entre agujero y agujero el software examina si el usuario requiere hacer una pausa en el proceso. Si se da esta condición, el sistema termina de hacer el agujero que está en proceso y se detiene, cuando se requiera reanudar el proceso el sistema continúa por donde iba, carga los datos del agujero siguiente y sigue con el proceso sin perder lugar del orden que indica la receta, ésta fue la razón primordial por la cual se decidió diseñar el proceso de troquelado utilizando el direccionamiento indexado. Cuando el sistema está en pausa el usuario puede abortar la receta y asumir la consecuencia de perder una sección de material.

Algoritmo de manejo de contraseñas

Es necesario un mecanismo de protección para que personas sin capacitación no puedan manipular el sistema y ocasionar posibles pérdidas de material, tiempo o algún accidente; por este motivo se implementó un algoritmo para el manejo de contraseñas que permite bloquear el control de la máquina y cambiar la contraseña de acceso.

Este bloque de software trabaja con archivos tipo entero y se activa cuando una señal del HMI lo indica. El algoritmo tiene las funciones de chequear o cambiar una contraseña numeral de cuatro dígitos.

Cuando se usa la función de chequear, este bloque realiza una comparación entre la contraseña ingresada por el usuario y la contraseña programada para acceder al sistema. Solamente cuando estas dos contraseñas sean iguales se puede continuar utilizando el sistema, de lo contrario éste permanece desplegando un teclado numérico y se indica al usuario que el controlador de la máquina está protegido por contraseña.

Cuando se utiliza la función de cambiar contraseña se pide al usuario ingresar la nueva contraseña dos veces, si se verifica que éstas son iguales se guarda el valor para chequear los ingresos posteriores si no, se pide al usuario reingresar de nuevo los datos.

Este bloque ejecuta funciones simples de comparación pero, es de gran importancia para la seguridad de hardware y de las personas que tengan acceso a la zona.

Algoritmo de diagnóstico

El algoritmo de diagnóstico chequea varios componentes necesarios para que el sistema funcione correctamente. Este procedimiento se hace al encender la máquina.

Se verifica que los controladores de servomotores no tengan errores y que se comuniquen correctamente, se chequea que las bombas del sistema hidráulico estén funcionando y que el compresor del sistema neumático esté encendido.

Si todas estas condiciones se dan, se puede seguir con el control de la máquina si no, se le indica al usuario cual elemento tiene problemas o está apagado para que sea puesto en marcha. Todo esto se despliega en una pantalla del HMI.

5.3.3 HMI

El HMI es la interfaz que permite manipular el sistema. Es importante aclarar que aunque el PLC es el encargado de controlar todos dispositivos de la máquina y de seguir el proceso del troquelado, éste no permite al usuario monitorear o acceder a las variables del proceso por sí mismo, por este motivo se requiere de una interfaz hombre-máquina que permita visualizar variables importantes, programar recetas y controlar el sistema en general.

El desarrollo del software del HMI se llevó a cabo utilizando el programa Easy Builder version 2.6.2 de Maple Systems. Este paquete de software de diseño permite programar de manera gráfica las pantallas que observará el usuario final en el HMI. Se pueden diseñar hasta dos mil pantallas diferentes con objetos para el monitoreo y control de bits y variables del PLC, botones, teclados numéricos, uso de librerías de figuras, entre otras funciones.

El software del HMI se diseñó pensando en la simplicidad para el usuario y en la funcionalidad para el proyecto. De esta manera, existen pantallas ilustrativas y mensajes para guiar al usuario a través de las funciones de la máquina. El software se dividió en varios bloques, a continuación se hace un recorrido por las pantallas que se utilizan para las funciones principales.

Manejo de contraseñas y diagnóstico del sistema

Luego de la pantalla inicial del sistema que se puede ver en la figura 5.13 se le solicita al usuario que ingrese la contraseña para el acceso. En la figura 5.34 se puede observar la pantalla correspondiente, en donde se presenta una pantalla con protección para lectura (cuando se digita la contraseña se despliegan asteriscos para no revelar la combinación) y un teclado numeral.

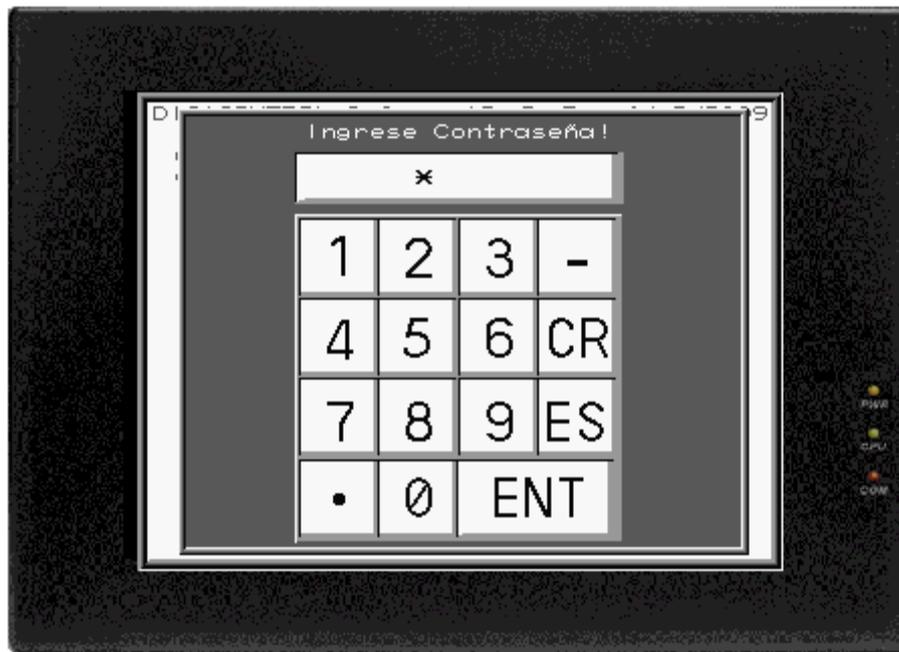


Figura 5.34 Pantalla del HMI para control de contraseñas.

El usuario debe ingresar la contraseña numeral programada y presionar la tecla ENT, esto da la orden al PLC para que revise las contraseñas, si la contraseña es correcta el sistema salta hacia la pantalla de diagnóstico de la máquina (figura 5.35), si no se muestra un mensaje al usuario para que la reingrese como se muestra en la figura 5.36.

En la pantalla de diagnóstico se puede observar el estado de cuatro variables principales para que la máquina pueda funcionar. Estas variables son: el estado de los servocontroladores BAI, el servocontrolador Indramat, el sistema neumático e hidráulico de la empresa. Se evalúa la comunicación de ambos servocontroladores, principalmente que estos se encuentren encendidos y funcionando (que halla comunicación y realimentación hacia el PLC). Cuando estas cuatro variables se den, el HMI brinca hacia la pantalla principal de funcionamiento del sistema.

Existe una pantalla para el cambio de contraseña muy similar a la de la figura 5.34, en donde se solicitan dos contraseñas en lugar de una. El usuario tiene que ingresar las dos contraseñas iguales y tocar el botón ENT para cambiar la combinación programada.



Figura 5.35 Pantalla del HMI para diagnóstico de la máquina.



Figura 5.36 Pantalla del HMI para control de contraseñas, contraseña incorrecta

Menú principal

Cuando las condiciones en la pantalla de diagnóstico se cumplan, el HMI salta hacia la pantalla principal de la máquina en donde se tiene acceso al menú de

troquelado en el cual se pueden programar recetas, controlar manualmente los servomotores (tanto en la dirección de x como de y), empezar alguna receta, controlar el rodillo que prensa la lámina y bloquear la máquina con la contraseña de seguridad.

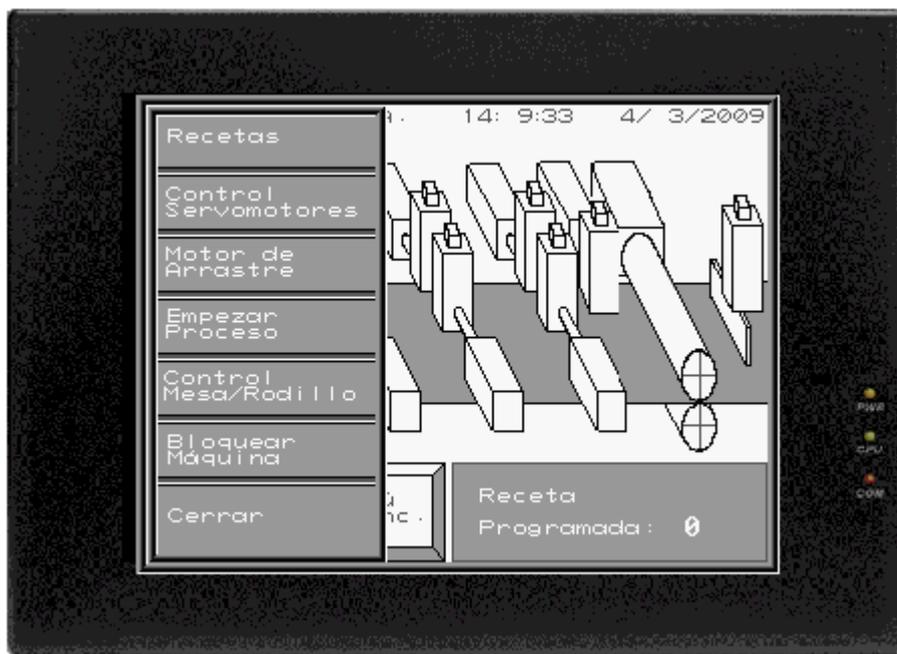


Figura 5.37 Pantalla del HMI, menú de troquelado.

Programación de recetas

En la figura 5.38 se muestra la pantalla para programación de recetas. El usuario debe seleccionar primeramente el número de receta que quiere programar y debe empezar a ingresar las dimensiones en milímetros de los agujeros que requiera la receta, así como el pistón con el que quiera hacer el agujero (de P1 a P10) y la velocidad de perforación.

Se debe tomar en cuenta que las distancias en la dirección de y son absolutas y en la dirección de x son relativas. Esto es, en y los pistones se mueven con respecto al punto cero calibrado en los servocontroladores y en x el rodillo de arrastre gira únicamente en un sentido para darle avance a la lámina, no se necesita calibración por que los giros son relativos a la distancia actual del motor.

Se empieza a programar por el agujero 1 y se aumenta el número del agujero hasta que se quiera hacer un corte en la lámina, en este caso se activa el pistón de corte o P10 (llamado también PC). Al presionar OK, el HMI activa un algoritmo que guarda la receta en la memoria del PLC y al mismo tiempo la deja seleccionada, por si se quisiera empezar el proceso.



Figura 5.38 Pantalla del HMI, programación de recetas.

Control manual de motores y de rodillo

Para esta función se hicieron dos pantallas, una para el desplazamiento en x y otra en y. La pantalla de movimiento manual del motor de arrastre pide al usuario la distancia de desplazamiento y tiene un botón para empezar el movimiento del motor. La pantalla de movimiento manual de los otros servomotores es muy parecida a la primera, la diferencia es que esta última solicita al usuario además el identificador del motor a mover (de M1 a M13) y tiene un botón para enviar el motor a Home.

En la pantalla de manejo de servocontroladores el botón Home hace un desplazamiento de las estructuras que soporta a los pistones hasta el punto cero, indicado por un interruptor de límite. Este punto cero es la referencia para todos los desplazamientos que realice el motor. Es necesario calibrar los motores antes de empezar con el proceso para garantizar la precisión de los agujeros en la lámina.

Para controlar el rodillo se hizo una pantalla con dos botones, uno para alzar el rodillo y otro para bajarlo. El rodillo debe estar abajo para empezar con el proceso, esto garantiza que la lámina se encuentre prensada para que ésta pueda ser arrastrada, de lo contrario no se va a deslizar por la mesa.

Proceso de troquelado

Cuando se presiona el botón "Empezar proceso" del menú de troquelado se despliega una pantalla en la que se puede ver un diagrama de la máquina troqueladora. Este diagrama es un objeto de animación en el HMI controlado por

el PLC, el cual refleja la acción que está siendo realizada por el sistema en tiempo real por ejemplo, si se está haciendo un agujero con el pistón P8 el diagrama cambia para indicar esa acción, como se puede observar en la figura 5.39, así con todos los pistones y motores. Además, se pueden monitorear las variables del movimiento en x y y, el pistón utilizado, la velocidad y el número de agujero que se está ejecutando en el momento.

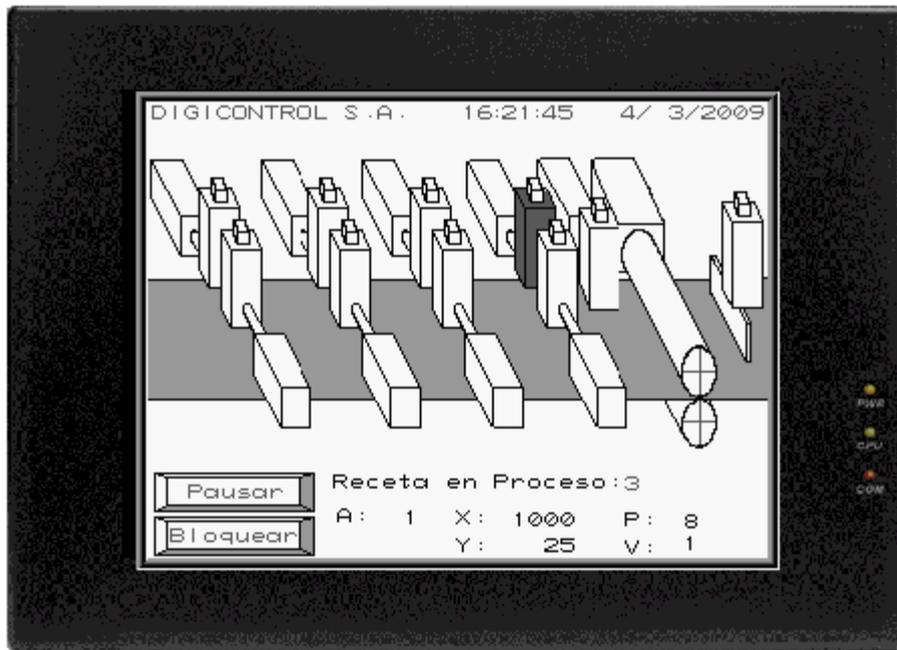


Figura 5.39 Pantalla del HMI, proceso de troquelado.

En esta pantalla se puede pausar el proceso de troquelado sin que el sistema pierda el orden de la receta, cuando se requiere una pausa sale una ventana indicando al usuario si desea reanudar o abortar el proceso. En caso de abortar se salta al menú principal y se detiene la máquina.

El botón que dice Bloquear hace que el HMI salte a la pantalla de ingreso de contraseña sin que el proceso se detenga para que la máquina quede protegida, cuando se ingresa la contraseña correcta el HMI salta de regreso a la pantalla de proceso de troquelado. Esta opción es importante en caso de que el operario tenga que separarse del control de la máquina.

Monitoreo de errores

Si en alguna parte del proceso de troquelado se diera un error en un motor, ya sea por comunicación o por funcionamiento del servocontrolador, el PLC detiene el proceso y activa una señal que indica al HMI que alguno de los motores tiene problemas. En este caso el operario deberá ponerse en contacto con personal técnico para la revisión del dispositivo, el servocontrolador que presente el error activa una señal para identificarlo.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos como producto de la solución del problema resuelto con este proyecto y se explica a fondo el alcance del mismo comparándolo con los objetivos propuestos.

Cuando se empezó con el proyecto uno de los primeros pasos fue analizar los requerimientos que debía tener el sistema que llegaría a resolver el problema de la empresa. Se comenzó a realizar un estudio de todos los dispositivos y equipo existente, se determinó mediante dibujos de la máquina y entrevistas con el ingeniero de la empresa el funcionamiento de ésta, así, se inició el progreso del proyecto con los objetivos de hardware.

Se hizo un listado de los elementos que se debían controlar analizando las características eléctricas, de comunicación y alimentación de cada uno. Se estableció así el hardware necesario para controlar el equipo electrónico existente. En la tabla 6.1 se muestra esta lista.

Tabla 6.1 Equipo electrónico a controlar por el sistema implementado

Cantidad	Equipo a controlar o señales requeridas	Características eléctricas	Equipo requerido
1	Servocontrolador Rexroth Indramat	Comunicación: RS-232	Módulo de comunicaciones RS-232 1746-BAS
		Alimentación: +24VDC	Fuente +24VDC (existente)
		Potencia: 200 - 480VAC, 12 - 28A	Contactora y protección (existentes)
13	Servocontroladores BA Intellidrive	Comunicación: RS-232	Módulo de comunicaciones RS-232 1746-BAS
		Alimentación: 110 - 220VAC, 10 A	Protecciones (existentes)
10	Electroválvulas proporcionales MOOG	Entrada: -10 a 10VDC, 100K Ω	3 Módulos salidas analógicas 1746-NO4V
		Alimentación: \pm 15VDC, 250mA	Fuente \pm 15VDC (existente)
10	LVDT Balluff	Salida: 0 a 10VDC	Módulo entradas analógicas 1746-NI16V
		Alimentación: \pm 15VDC, 150mA	Fuente \pm 15VDC (existente)
5	Entradas de estado e interruptores de límite	Señal: +24VDC	Módulo entradas digitales 1746-IB16 (existente)
5	Solenoides y salidas de control	Salidas: 110VAC y +24VDC	Módulo de salidas de relés 1746-OW16 (existente)

La lista del equipo a controlar y las características eléctricas de estos que se muestran en la tabla 6.1 fueron el punto de partida para la elección del hardware necesario. Tomando en cuenta que la empresa tenía algunos módulos digitales, chasis y fuente para el PLC tipo Allen Bradley SLC500, y además una HMI con interfaz serie RS-232 con comunicación por protocolo DF1; se tomó la decisión de completar el hardware necesario con modelos compatibles con el hardware existente.

En la figura 6.2 se muestra el equipo electrónico que tenía la empresa y el que hubo que adquirir. El equipo se escogió de forma que llegara a satisfacer los requisitos de todos los dispositivos que había que controlar en la máquina.

Tabla 6.2 Equipo electrónico adquirido y existente para el proyecto

Hardware adquirido		Hardware existente	
Cantidad	Descripción	Cantidad	Descripción
1	Fuente para PLC +24VDC, 1746-P4	1	Fuente para PLC +24VDC, 1746-P2
1	PLC, SLC 5/04 con CPU 1747 L543/C	1	Chasis para 13 módulos, 1746-A13
1	Módulo de comunicaciones RS-232, 1746 BAS	6	Módulo 16 entradas digitales, 1746-IB16
1	Módulo 16 entradas analógicas, 1746-NI16V	6	Módulo 16 salidas digitales, 1746-OW16
3	Módulo 4 salidas analógicas, 1746-NO4V	1	HMI Maple 520M-006
1	Chasis para 7 módulos, 1746-A7	1	Fuente de ±15VDC
1	Cable para programación, 1747-CP3	1	Fuente de 24VDC
1	Cable para interconexión de chasis, 1746-C16		

Se tomó en cuenta el consumo de cada uno de los módulos y se organizaron en dos diferentes chasis, uno de 7 ranuras y uno de 13 como se puede observar en las tablas 6.3 y 6.4. La alimentación para el HMI y para algunas señales de entradas digitales de 24VDC fue tomada de la fuente P4.

Aunque en este proyecto se utiliza únicamente el chasis 1 y un módulo de salidas digitales del chasis 2, la organización de los módulos tuvo que planearse pensando en la automatización de las otras secciones de la línea de producción que se desarrollará después de concluido este proyecto.

Tabla 6.3 Consumo de corriente de módulos en chasis 1

Cantidad	Módulo	Consumo individual (mA)		Consumo total (mA)	
		24VDC	5 VDC	24 VDC	5 VDC
1	1747-L543C	0	1000	0	1000
1	1746-BAS	40	150	40	150
1	1746-NI16V	60	110	60	110
3	1746-NO4V	145	55	435	165
1	1746-OW16	180	170	180	170
			Consumo total (mA)	715	1595
			Capacidad Fuente P2 (mA)	960	5000
			Excedente (mA)	245	3405

Tabla 6.4 Consumo de corriente de módulos en chasis 2

Cantidad	Módulo	Consumo individual (mA)		Consumo total (mA)	
		24VDC	5 VDC	24 VDC	5 VDC
5	1746-OW16	180	170	900	850
6	1746-IB16	0	85	0	510
			Consumo total (mA)	900	1360
			Capacidad Fuente P4 (mA)	2880	10000
			Excedente (mA)	1980	8640

El PLC adquirido se escogió tomando en cuenta criterios como alta capacidad de memoria (64KB) y facilidad para la implementación del algoritmo de control automático PID. Este controlador es compatible con todos módulos que se listan en la tabla 6.2 y además con el HMI, no es necesario ningún tipo de interfaz inteligente para comunicar el PLC con el HMI puesto que los dos manejan el protocolo de comunicación DF1.

Se estudió el HMI existente en la empresa y se decidió que éste cumplía con todos los requerimientos del proyecto por este motivo se implementó el sistema, al igual que los demás módulos existentes, con el fin de bajar los costos del proyecto. Se hizo cotizaciones del equipo necesario en sitios en Internet como www.plccenter.com y www.ebay.com, a petición de la empresa.

De esta forma, se seleccionó y adquirió el hardware necesario para implementar la solución al problema, que cumple con los requisitos del proyecto tanto a nivel eléctrico, de compatibilidad y de escalabilidad.

Se prosiguió de esta manera a programar y configurar el módulo de comunicaciones 1746-BAS como se explicó en la sección 5.3.1. Con el algoritmo de envío y recepción de comandos programados en el PLC y utilizando la terminal de comunicaciones serie Hercules Setup Utility se hicieron pruebas de transmisión y recepción de comandos por los dos puertos del módulo. En la figura 6.1 se puede observar la recepción en la terminal de comandos enviados por el PLC, se puede notar la trama de los dos tipos de comandos (primero BAI, luego Indramat) explicada en la sección 5.3.2 (figura 27), el número de bytes a transmitir es una porción de la trama que se queda en el módulo de comunicaciones y no sale hacia los servocontroladores. Se realizaron pruebas de recepción de comandos en el PLC, transmitiendo con la terminal y obteniendo los datos en las tablas de archivos usando el programa RSLogix, de igual manera obtuvo una recepción satisfactoria de las tramas.

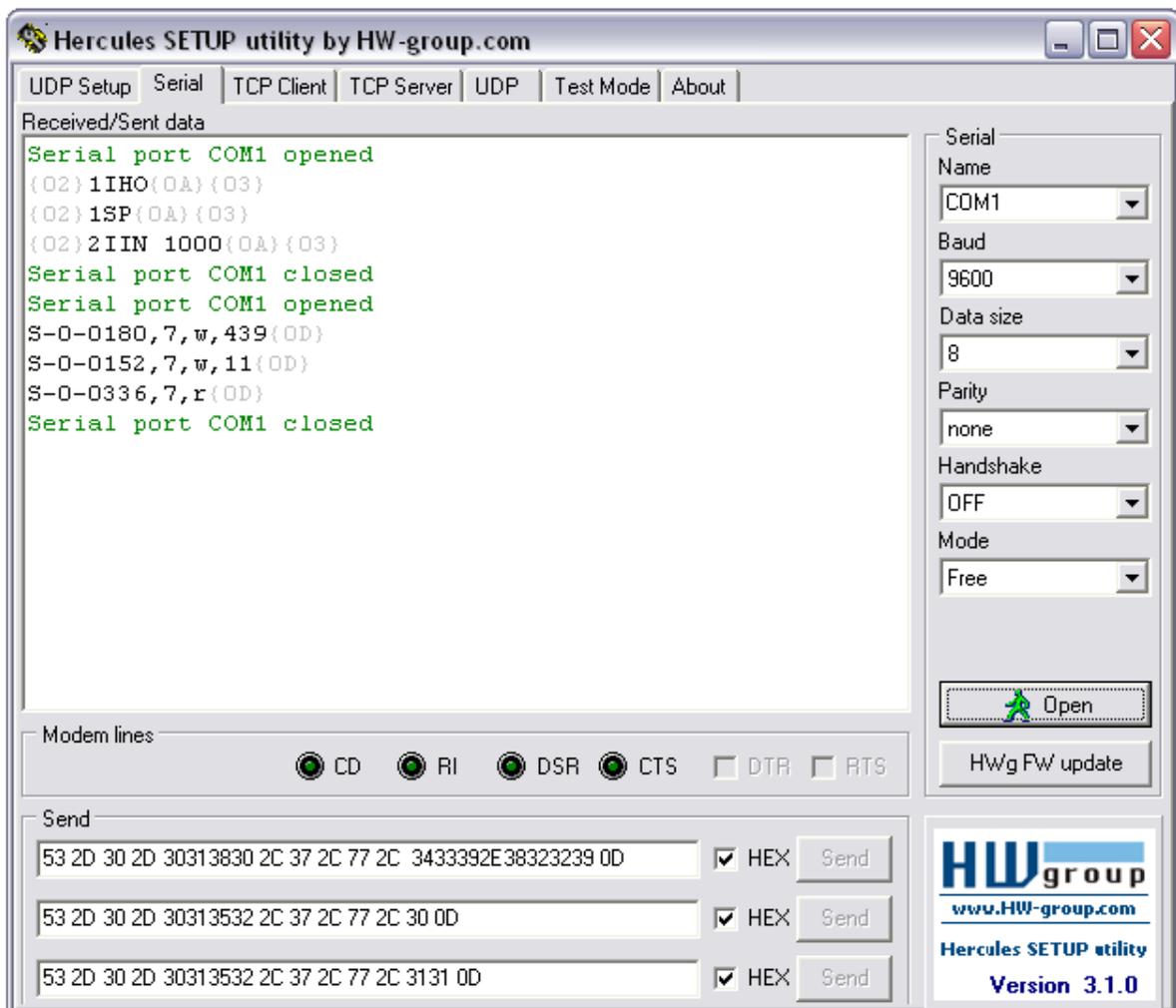


Figura 6.1 Pruebas de comunicación del módulo 1746-BAS hechas con el PLC.

Cabe resaltar que la configuración del protocolo RS-232 (velocidad de 9600 baudios, paquete de 8 bits, sin paridad, un bit de parada) hecha en módulo es la misma que la que se ve el terminal, esto garantiza que las transmisiones se están llevando a cabo bajo estas condiciones que son las mismas que tienen programados los controladores de servomotores.

Con las pruebas satisfactorias del módulo de transmisiones y el algoritmo de recepción y transmisión en el PLC se procedió a realizar pruebas de desplazamiento a los motores de M1 a M13. Para esto fue útil hacer uso del algoritmo de “Control manual de servomotores” programado en el PLC y en el HMI. El parámetro de la relación lineal-rotacional que se explica en la sección 3.3 de este informe fue programado en los controladores previamente.

En la tabla 6.5 se muestran los resultados obtenidos al hacer estas pruebas, todas las mediciones se hicieron con respecto al punto fijo de la máquina. Se puede notar que en los desplazamientos a 5 y 20mm no se dio ningún error en la posición, en el desplazamiento a 50mm de los motores 6 y 8 se observó un error de un milímetro en aumento, este error se mantuvo en estos motores para la medición del desplazamiento a 100mm, se nota como los motores 5, 7 y 9 llegaron al máximo de carrera al pretender llevarlos a una distancia superior en la prueba de distancia a 100mm.

Estas pruebas se hicieron varias veces en todos los motores y no se obtuvo un error mayor a un milímetro, no se descarta la fuente de error que implica el haber utilizado un instrumento de medición con una escala mínima de un milímetro, como otra posible fuente de error se puede mencionar el juego que existe en los acoples mecánicos, sin embargo se puede concluir que con respecto a los desplazamientos en la dirección de y que el margen de error se mantiene dentro de ± 1 mm.

Tabla 6.5 Pruebas de desplazamiento de servomotores en la dirección de y

Servomotor	Distancia en Home (mm)	Distancia a 5mm (mm)	Distancia a 20mm (mm)
1	18	23	38
2	14	19	34
3	20	25	40
4	15	20	35
5	25	30	45
6	12	17	32
7	18	23	38
8	17	22	37
9	23	28	43
10	30	35	50
11	18	23	38
12	22	27	42
13	19	24	39

Tabla 6.5 Pruebas de desplazamiento de servomotores en la dirección de y (continuación)

Servomotor	Distancia a 50mm (mm)	Distancia a 100mm (mm)	Distancia máxima (mm)
1	68	118	324
2	64	114	323
3	70	120	333
4	65	115	340
5	75	101	101
6	63	113	156
7	68	106	106
8	68	118	172
9	73	101	101
10	80	130	166
11	68	118	177
12	72	122	175
13	69	119	200

Una vez probado el desplazamiento en la dirección de y de las estructuras metálicas que soportan los pistones y troqueles de la máquina, se procedió a medir la precisión del servomotor MA. En la tabla 6.6 se puede observar las pruebas de arrastre de lámina hechas en la máquina.

Tabla 6.6 Pruebas de desplazamiento de la lámina en la dirección de x

Distancia de prueba (mm)	Medición 1 (mm)	Medición 2 (mm)	Medición 3 (mm)	Medición 4 (mm)	Medición 5 (mm)	Promedio (mm)
50	50	50	50	50	50	50,0
200	200	200	200	198	200	199,6
500	500	500	499	500	498	499,4
1000	1002	1000	1002	1001	1002	1001,4
2000	2004	2002	2001	1998	1998	2000,6
3000	3002	2998	3000	3001	3000	3000,2

De la tabla anterior se puede observar que el mayor error obtenido en las mediciones hechas al arrastre de la lámina fue de 4 mm en una muestra, se ve como el error es más notable en los desplazamientos más grandes, sin embargo la media de las mediciones hechas no muestra un error mayor a 2mm.

En las pruebas del arrastre de la lámina hechas se manifestaron diversas fuentes de error. La mayoría de éstas son propias del funcionamiento de la máquina, en lo que se observó en la prueba se pueden mencionar varios factores influyentes como el rozamiento de la lámina con las partes no móviles de la máquina lo cual produce un deslizamiento de la lámina entre los rodillos, esto ocasiona error en la posición requerida. Se observó además que la lámina debe estar lo más plana posible y debe de ser prensada con los roles de las mesas guías de entrada y salida para minimizar el movimiento en y del material. En las mediciones hechas se utilizó un instrumento de medición con una incertidumbre de ± 1 mm.

Luego de realizadas las pruebas de desplazamiento de motores, se procedió a analizar el comportamiento de los pistones sin aplicar control automático. En la figura 6.2 se muestra la respuesta que tuvo el pistón P8 de la máquina al aplicarle un comando de velocidad y detener el movimiento a los 25mm. La escala Y en los gráficos está en milímetros y la X en tiempo (12s por división).

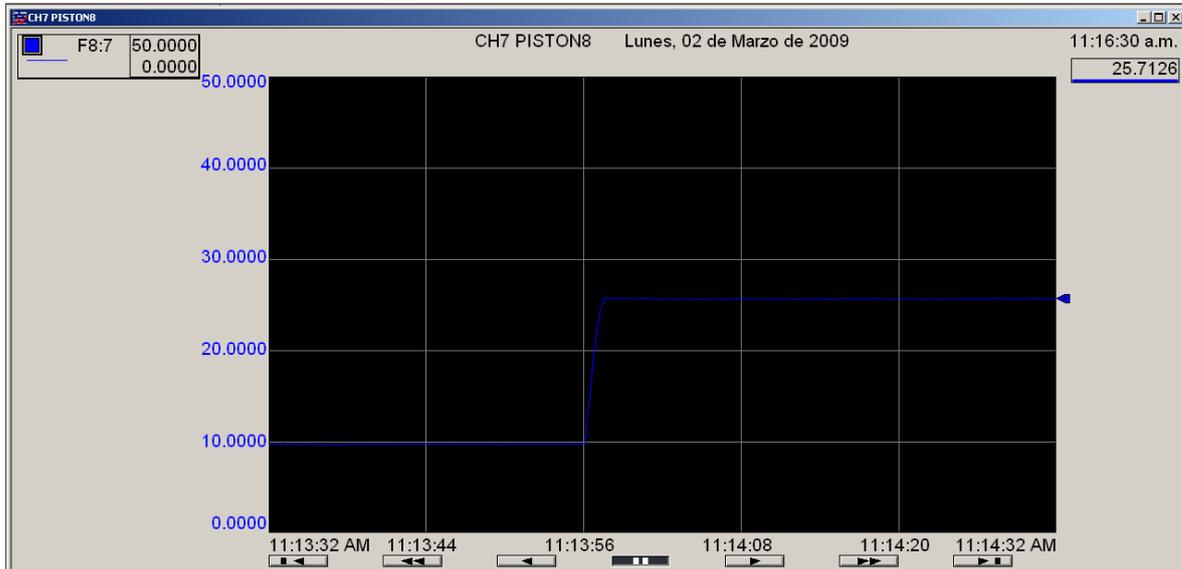


Figura 6.2 Prueba de posicionamiento de un pistón de la máquina a 25mm sin control PID; respuesta ~ 2s, error de 0.71mm.

En esta prueba se puede observar como el pistón llegó hasta 25.71mm de valor final, esto indica un error en la posición de 0.71mm lo cual es un buen resultado para el proyecto, pero en este caso le tomó al pistón de 2 a 3 segundos llegar a alcanzar la posición indicada.

En una segunda prueba se aumentó la velocidad del pistón, buscando una respuesta más rápida del posicionamiento del troquel. Se tomó la medición que se muestra en la figura 6.3



Figura 6.3 Prueba de posicionamiento de un pistón de la máquina a 25mm sin control PID; respuesta < 1s, error de 8.84mm.

Se puede observar en esta segunda prueba como la respuesta del pistón fue de menos de un segundo, sin embargo el valor final de posición de este fue de 33.84mm, obteniendo un error en la posición de 8.84mm.

En las dos pasadas figuras se nota el comportamiento del pistón sin aplicarle un control automático en la posición. Se puede obtener un error pequeño en la posición a costo de un tiempo de respuesta lento, o bien se puede obtener un buen tiempo de respuesta de posicionamiento con un error en el valor final inaceptable para el proyecto.

De esta manera, se decidió implementar un sistema de control de posición utilizando un algoritmo de control PID. En la sección 3.3 se muestra el diseño del controlador, para el cual se determinó un modelo matemático y se obtuvo finalmente, una ecuación de diferencias que se programó en un bloque para control PID soportado en el PLC.

En la figura 6.4 se muestra la respuesta al posicionamiento a 25mm del pistón P8 al implementar el controlador PID en el accionamiento. En este gráfico se muestra como la respuesta del pistón es de aproximadamente un segundo y el valor final se estabiliza a 25.09mm, obteniéndose un error de estado estacionario de 0.09mm y un sobreimpulso no mayor a 0.3mm. Se concluye de esta manera que al implementar el controlador PID se mejora el comportamiento dinámico y estático del sistema, lo cual ofrece una respuesta rápida y con error pequeño del posicionamiento del pistón.

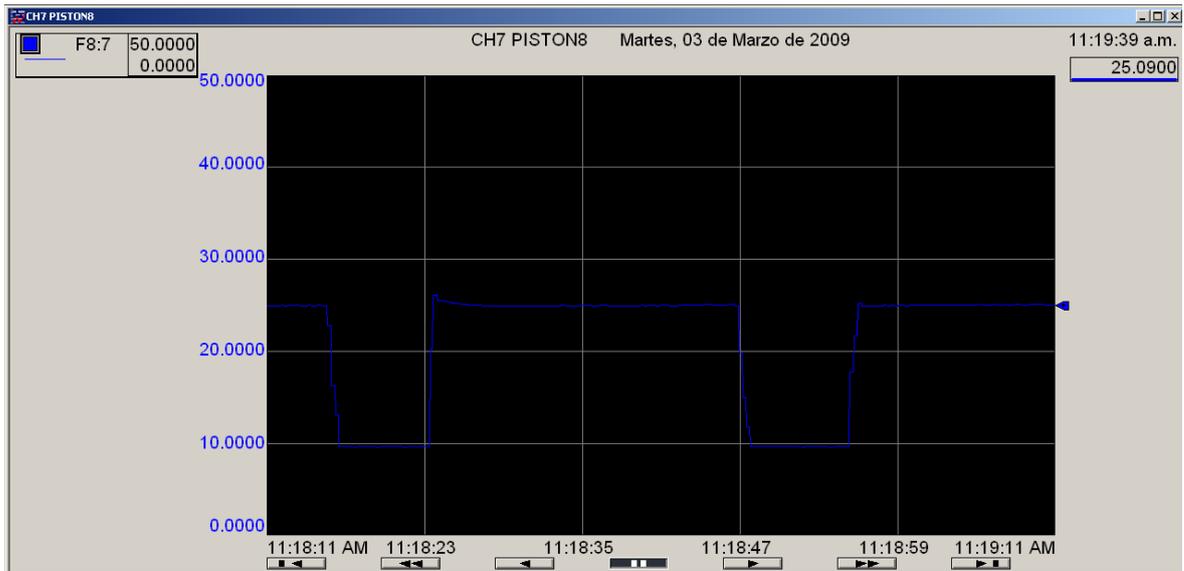


Figura 6.4 Prueba de posicionamiento de un pistón de la máquina a 25mm con control PID; respuesta < 1s, error de 8.84mm.

El posicionamiento controlado hasta el punto Z1 (figura 3.8) es de gran importancia para continuar con el tramo de perforación a una velocidad menor lo cual va a aumentar la vida útil del troquel. Luego de llegar a esta posición se envió un comando al pistón para que se iniciara el desplazamiento del troquel a velocidad constante y cuando llegó al punto Z2 (30mm) se retrajo hasta la posición de inicio. Este proceso controlado del golpe del troquel se puede ver en la figura 6.5.

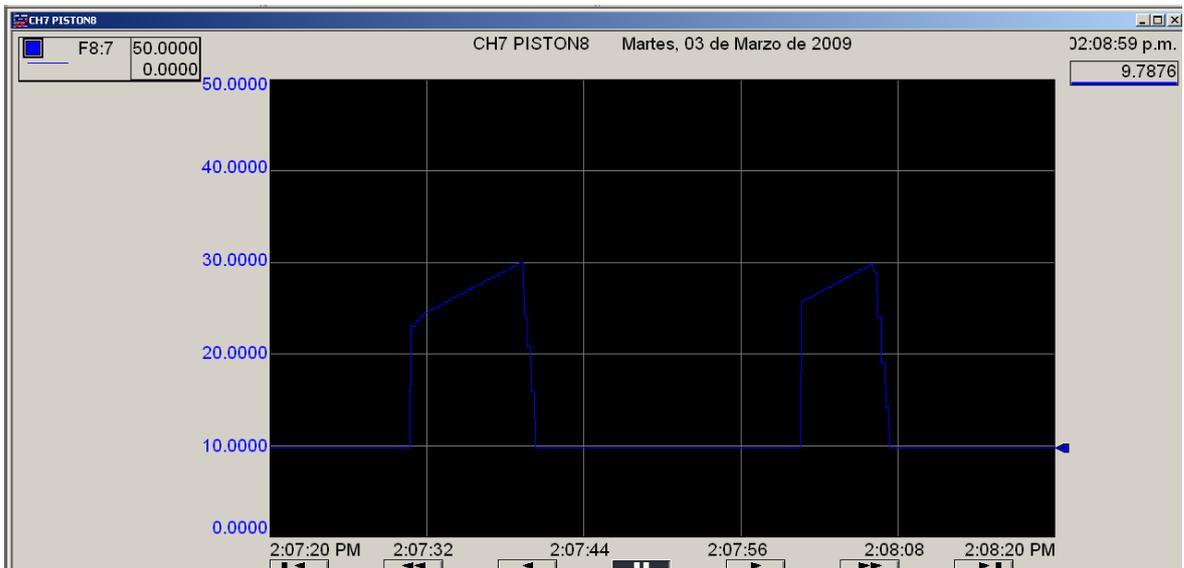


Figura 6.5 Prueba de accionamiento del golpe controlado del troquel montado en el pistón P8 de la máquina; Z1=25mm, Z2=30mm, V ~ 1mm/s.

Habiendo probado la precisión en el posicionamiento de motores y teniendo una respuesta controlada del perforado, se procedió a diseñar una receta de prueba para el troquelado de la lámina. En la tabla 6.7 se observa la receta programada en el sistema y los resultados obtenidos (el ajuste del golpe del pistón es el que se observa en la figura 6.5).

Tabla 6.7 Receta de troquelado probada en la máquina

Agujero	Distancia programada (mm)			Distancia medida (mm)		Error (mm)	
	X	Y	P	X	Y	X	Y
1	0	70	8	0	70	0	0
2	50	70	8	50	70	0	0
3	100	80	8	100	80	0	0
4	100	80	8	100	80	0	0
5	100	90	8	99	91	1	1
6	100	90	8	99	90	1	0
7	100	100	8	100	99	0	1
8	100	100	8	99	100	1	0

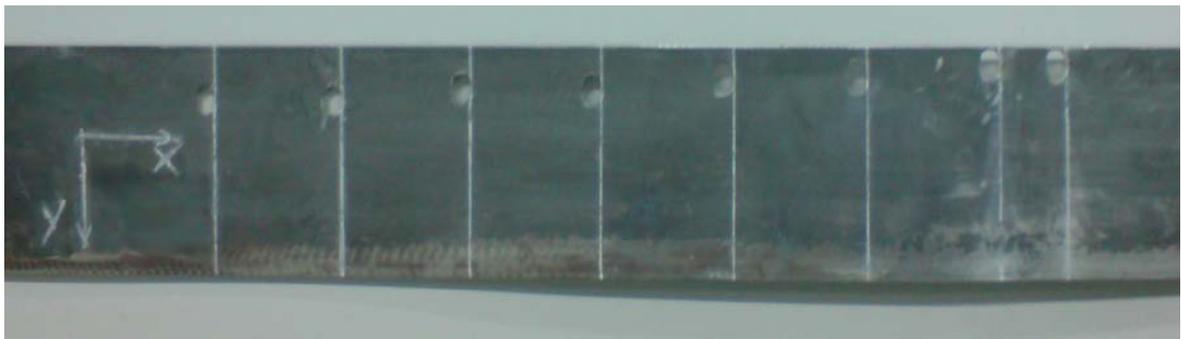


Figura 6.6 Fotografía tomada a la lámina perforada en la prueba realizada.

En la figura 6.6 se puede observar una lámina perforada de manera automática por la máquina troqueladora con el sistema desarrollado corriendo la receta de prueba observada en la tabla 6.7. El primer agujero hecho es el que se observa más a la derecha en la fotografía, éste punto se tomó como la referencia $x = 0$ para las mediciones. La estructura que soporta el troquel se tuvo que mover hasta 70mm en la dirección de y para poder hacer el primer agujero (esto por que la lámina utilizada era de un ancho menor al que se debe trabajar idealmente en la máquina). De aquí, la lámina se empezó a mover en la dirección de x (los huecos en la dirección de $-x$) y el troquel se desplazó en la dirección de y conforme se corrió la receta. Se recuerda al lector que los movimientos en x son relativos y los movimientos en y son absolutos, así para el agujero 3 por ejemplo, el troquel se debe mover a 80mm en y y se debe desplazar la lámina 100mm antes de hacer el agujero.

Como se observa en la tabla 6.7 los errores obtenidos en esta prueba no superan un milímetro en ambas direcciones.

Luego probar el funcionamiento de la máquina con una receta, se procedió a hacer pruebas del monitoreo de errores en los servomotores. Primeramente, se encendió el sistema y se esperó por la pantalla de diagnóstico (como se explicó en la sección 5.3.3) cuando todos los dispositivos estaban listos el HMI desplegó la pantalla principal, en este momento se disparó manualmente la protección de potencia del controlador Indramat, el PLC reconoció el error y lo desplegó en el HMI como se observa en la figura 6.7.



Figura 6.7 Pantalla tomada en la prueba de error de servocontrolador Indramat, simulación online.

En la figura 6.8 se muestra la respuesta del sistema ante problemas de comunicación de los servocontroladores BAI, para esta prueba se quitó la alimentación de uno de estos. La pantalla que se muestra en el HMI permite al usuario reintentar la comunicación con los controladores. Debido a que estos dispositivos se encuentran enlazados en configuración de anillo, con solo uno que falle el sistema de control de la máquina despliega el error.

Luego de los resultados obtenidos se concluye que el sistema implementado cumple las expectativas del objetivo principal de este proyecto. Se logró poner a funcionar la máquina troqueladora de la empresa y se logró que la máquina agujerara una lámina de hierro de 2 mm de espesor de manera automática, siguiendo una receta previamente programada con un error no mayor a 1mm en los huecos.



Figura 6.8 Pantalla tomada en la prueba de error en controladores BAI, simulación online.

Además, la solución al problema se llevó a cabo utilizando un sistema de control capacitado para acoplarse a la futura automatización de toda la línea, se utilizó el equipo existente en la empresa, cumpliendo con los requerimientos estipulados en un principio. Con esto se alcanza la meta propuesta para el proyecto.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

1. El PLC Allen Bradley SLC 5/04 junto con los módulos seleccionados y adquiridos para la implementación del proyecto es capaz de cumplir con los requerimientos de compatibilidad con el equipo existente y escalabilidad del proyecto.
2. El HMI implementado en la solución del proyecto permitió manejar el sistema de control de una manera gráfica y monitorear variables e información importante del proceso de troquelado, cumpliendo de esta manera con las funciones de interfaz hombre-máquina requeridas.
3. El módulo de comunicaciones 1746-BAS adquirido fue capaz de establecer la comunicación serie mediante protocolo RS-232 necesaria para comandar los controladores de servomotor existentes en la empresa.
4. Se diseñaron dos tramas de comunicación diferentes que permitieron enviar y recibir información de los controladores de servomotor para poder ser manejados de manera remota.
5. El control automático de posición diseñado e implementado en el sistema permitió que el golpe de los troqueles de la máquina se diera de una manera controlada, cumpliendo con las especificaciones planteadas en la sección 3.1.
6. El paquete de software RSLogix 500 permitió desarrollar el programa alojado en el PLC utilizando la programación de diagrama en escalera, además fue una herramienta útil para analizar el comportamiento del control del golpe de los pistones diseñado facilitando el uso de gráficos de variables analógicas en tiempo real (trend).
7. El software Maple EasyBuilder permitió programar de manera gráfica la interfaz hombre-maquina utilizada para controlar la máquina troqueladora y monitorear el estado de ésta de una forma amigable con el usuario.
8. El software Hercules Setup Utility permitió monitorear los puertos serie del módulo 1746-BAS y probar la comunicación entre éste y los controladores de servomotor.
9. El sistema de control implementado mediante la realización de este proyecto permitió poner en funcionamiento la máquina troqueladora de la empresa EUROMOBILIA S.A. obteniendo un error no mayor a 1mm en la posición de los agujeros hechos en la prueba explicada en la sección 6.

7.2 Recomendaciones

Este proyecto fue desarrollado como un subproyecto de la automatización de la línea de producción de rieles de metal de la empresa EUROMOBILIA S.A., proceso que se está llevando a cabo actualmente. Hasta que toda la línea se encuentre en funcionamiento se tendrá más claro las mejoras que se puedan hacer a la sección de troquelado, sin embargo algunas recomendaciones se ofrecen a continuación.

1. Resulta conveniente implementar un sistema de respaldo en la energía eléctrica tipo UPS o banco de baterías principalmente para los dispositivos de control. Esto debido a que los servocontroladores pierden su referencia cuando se reinician, actualmente cuando sucede un corte de energía los controladores se tienen que calibrar antes de empezar con el proceso lo cual resta tiempo a labores de producción.
2. Mejora al control de los pistones. En este proyecto no se tomo en cuenta los diferentes tipos de espesor de la materia prima que se podrían llegar a utilizar, sino que el diseño del golpe fue ajustado para láminas de 2mm grueso. En cuanto a este aspecto se hace la recomendación de ampliar el programa en el PLC y de diseñar en la interfaz HMI una pantalla que permita que los valores Z1 y Z2 puedan ser modificados por el usuario y así la máquina se ajuste a otros gruesos de material. Claro está que esto conlleva a un estudio mecánico de las capacidades que tienen los pistones en cuanto a la fuerza necesaria para perforar láminas de mayor espesor, pero si se decidiera hacer es importante que el sistema de control facilite la calibración de estos parámetros.
3. Expansión de comunicaciones para el acceso remoto del sistema. Esto se podría llegar a necesitar dependiendo principalmente de requerimientos del departamento de producción y mantenimiento de la empresa, para lograr esto se puede agregar un módulo de conexión EtherNet al PLC con la idea de acceder a una base de datos utilizando el protocolo TCP-IP. Esto permitiría a estos departamentos llevar un registro de la producción y estado de la máquina, historial de paros, e inclusive control remoto desde una página en Internet. Aspecto al que su importancia se va a determinar en un futuro.

Bibliografía

- [1] Aerotech, **BA Intellidrive User Manual**. [En línea] <ftp://www.aerotech.com/filedownloads/BA_intellidrive/> [Consulta: 16/02/09].
- [2] Allen Bradley, **BASIC Language 1746-RM001**. [En línea] <http://www.literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/1746-rm001_-en-p.pdf> [Consulta: .20/02/09].
- [3] American Society for Testing Materials. **Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material**. United States of America: ASTM 1984, Reapproved 2000, 4p. (ASTM E-643-84).
- [4] Balluff, **Linear Position Transducer Users Guide**. [En línea] <http://www.balluff.com/NR/rdonlyres/8FF2F56A-7F6C-4B69-9EBC-1C6C2B43BC7C/0/BTLZ_Analog_317093_122003.pdf> [Consulta: 18/02/09].
- [5] **Cilindros hidráulicos y neumáticos**. [En línea] <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica22.htm> [Consulta: 11/07/08.]
- [6] Cuartas, Andrés; Arias, Alexander; Castañeda, Edison. **Acondicionamiento de equipo para prueba Erichsen de embutido**. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. 2007.
- [7] Interiano, Eduardo. **Compensador de adelanto en el lugar de las raíces**. [En línea] <<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/>> [Consulta: 26/02/09].
- [8] Interiano, Eduardo. **Controlando un sistema térmico**. [En línea] <<http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control2/>> [Consulta: 25/02/09].
- [9] Maple Systems, **HMI 500 Series Installation and Operation Manual**. [En línea] <http://www.maplesystems.com/products/silverseries/silverseries_ezw.htm> [Consulta: 18/02/09].
- [10] Moog, **D661 Series ISO 4401 Size 05 Installation and Operation Instruction**. [En línea] <http://www.moog.com/Industrial/Product/-/p_5118/t_1735/> [Consulta: 12/02/09]
- [11] Rexroth Indramat, **Firmware FWA-ECODR3-SMT-01VRS-MS, Functional Description Manual**. [En línea] <http://www.boschrexroth.no/country_units/america/united_states/en/products/brc/ProductDocumentation/CurrentProducts/Drives/index.jsp> [Consulta: 16/02/09].
- [12] Rexroth Indramat, **Project Planning Manual**. [En línea] <http://www.boschrexroth.no/country_units/america/united_states/en/products/brc/ProductDocumentation/CurrentProducts/Drives/index.jsp> [Consulta: 16/02/09].
- [13] Rexroth Indramat, **Electromagnetic Compatibility (EMC) in Drive and Control Systems**. [En línea] <<http://www.esd.bg/download/Indramat/Electromagnetic%20compatibility%2025981402.pdf>> [Consulta: 18/02/09].
- [14] Rockwell Automation Allen-Bradley, **SLC 500: PLC y módulos**. [En línea] <http://www.literature.rockwellautomation.com/idc/groups/public/documents/webassets/browse_category.hcst> [Consulta: 31/07/08].

- [15] Roelands, R.P.P. ***Modeling the Dynamics of Hydraulic Press Brakes.*** [En línea] <<http://alexandria.tue.nl/repository/books/633188.pdf>> [Consulta: 26/02/09].
- [16] Rossi, Mario. ***Estampado en frío de la chapa. Estampas, Matrices, Punzones, Prensas y Máquinas.*** 9na. Ed. Editorial Dossat S.A. Madrid 1979.

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

A: Amperios, unidad de medida de corriente.

Actuador: Dispositivo que realiza una acción física al aplicarle una señal eléctrica.

Allen Bradley: Marca de dispositivos electrónicos entre ellos PLCs

ASCII: Código Estadounidense Estándar para el Intercambio de Información

Automatización: Proyecto electrónico que tiene como fin modificar un sistema para que éste realice un proceso de manera automática.

BAI: Servocontrolador marca Aerotech, modelo: BA Intellidrive

BASIC: Lenguaje de programación de dispositivos electrónicos

Baudio: Unidad de medida de transmisiones de datos, equivale a un símbolo por segundo.

Bit: Mínima cantidad de información de un computador digital, estado de 1 o 0

Bobina: Lámina de metal en forma de rollo.

Breaker: Dispositivo de protección que abre un circuito electrónico al pasar cierta magnitud de corriente.

Byte: Conjunto de 8 bits.

Chapa: Lámina de metal.

Chasis: Panel de conexiones eléctricas en el que se conecta un PLC y sus módulos.

Consigna: punto de ajuste al que se quiere llegar con un sistema de controla automático.

Contactador: Interruptor que es accionado eléctricamente por medio de un solenoide.

Daisy chain: Configuración en anillo para comunicación de dispositivos

Desbobinador: Aparato que se encarga de desenrollar las bobinas de metal.

DF1: Protocolo de comunicación con paquetes de información de PLC.

DH+: Data Highway Plus, bus para comunicación utilizado por Allen Bradley

DH485: Data Highway, bus para comunicación utilizado por Allen Bradley

Diagrama de escalera: Lenguaje de programación que utiliza contactos y bobinas como elementos principales para establecer una lógica de control.

Electroválvula: Válvula que tiene uno o varios solenoides para ser accionada electrónicamente.

EMC: Compatibilidad Electromagnética

EMI: Interferencia Electromagnética.

Escalabilidad: Característica de un equipo o proyecto para admitir cambios, actualizaciones y mejoras

EtherNet: Protocolo de comunicaciones a nivel eléctrico.

Fastwall: Producto fabricado por la empresa EUROMOBILIA S.A. para paneles de cubículos.

Guillotina: Máquina para cortar las láminas de metal.

Hardware: Componentes físicos o materiales, generalmente de un sistema electrónico

HMI: Interfaz Hombre Máquina

Home: Posición de referencia o cero de los servomotores

Hz: Hertz, unidad de medida ciclos por segundo.

Indramat: Servocontrolador marca Rexroth Indramat

ITCR: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

KD: Constante derivativa en un control PID

KI: Constante integral en un control PID

KP: Constante proporcional en un control PID

KW: Kilo Watts, medida de potencia

LVDT: Transductor de Desplazamiento de Voltaje Lineal

mA: Miliamperios, milésima parte de un amperio.

mm: Milímetros, milésima parte de un metro.

ms: milisegundo, milésima parte de un segundo.

NEMA: Índice de protección estandarizado por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de los Estados Unidos.

Nm: Newton metro, unidad de medida de torque.

PID: Algoritmo de control Proporcional Integral Derivativo.

Pistón hidráulico: Pieza que se mueve alternativamente en el interior de un cilindro y es accionada por aceite.

Pistón neumático: Pieza que se mueve alternativamente en el interior de un cilindro y es accionada por aire.

PLC: Controlador Lógico Programable.

Protocolo: Serie de reglas o procedimiento que existe en las comunicaciones eléctricas.

RF: Radiofrecuencia.

RS-232: Estándar para la comunicación serie de dispositivos electrónicos.

RSLogix500: Software para la programación en escalera de Allen Bradley.

Rx: Recepción.

Servocontrolador: Dispositivo electrónico que controla el movimiento de un servomotor.

Servomotor: Motor que es controlado para ajustar una posición específica en su eje.

Simulink: Software para simulación de sistemas, propiedad de Matlab.

Sobreimpulso: exceso en el comportamiento de una variable con respecto a un punto de ajuste.

Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para

ejecutar ciertas tareas en una computadora.

Transductor: Dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.

Troquel: Herramienta que se utiliza para cortar láminas de metal por presión.

Troquelado: Proceso de hacer agujeros en láminas utilizando troqueles.

Tx: Transmisión.

UPS: Fuente de Poder Ininterrumpible, dispositivo de respaldo de energía con baterías.

V: Voltios, medida de diferencia de tensión.

VAC: Voltios en corriente alterna.

VDC: Voltios en corriente directa.

A.2 Manual de usuario

Se explican las secciones del software de la interfaz hombre máquina o HMI. Esta interfaz es una pantalla táctil en la cual se deben presionar los botones que se despliegan para hacer uso de los diferentes menús y funciones.

Cuando se enciende el sistema se debe presionar el botón de entrada, una vez hecho esto, se despliega la pantalla de ingreso de contraseña.

Ingreso de contraseña

Se debe conocer la contraseña de ingreso al sistema para poder controlar la máquina. La contraseña consta de 4 dígitos numerales. Se debe tomar en cuenta:

1. Para ingresar la contraseña de debe tocar el cuadro de ingreso numeral y presionar los números
2. El botón CR se utiliza para borrar los datos ingresados.
3. El botón ESC se utiliza para abortar el ingreso de datos
4. El botón ENT se debe presionar para evaluar la contraseña y poder continuar.
5. Si la contraseña no es la correcta se debe ingresar de nuevo.
6. Si la contraseña es la correcta, el sistema despliega la pantalla de diagnóstico.

Diagnóstico

En esta pantalla pueden encender o apagar los dispositivos necesarios para que funcione el sistema. Esto es: los controladores de servomotores, el sistema hidráulico y neumático.

Se debe tocar el botón de encendido, el botón indica el estado actual ya sea OFF (apagado) u ON (encendido).

Cuando se encienden los dispositivos se debe esperar a que las señales luminosas de estado cambien a un color blanco.

Cuando todas las condiciones se dan, aparece una flecha que se debe presionar para continuar hacia la pantalla principal.

Pantalla Principal

En la pantalla principal se puede ver la receta seleccionada y varias variables del estado de la máquina, a saber:

X: Distancia de desplazamiento de la lámina en milímetros para el agujero A

Y: Posición en milímetros del troquel montado sobre el pistón P.

A: Número de agujero

V: Velocidad de perforación del troquel.

P: Pistón que está haciendo el agujero A.

Cuando se esté corriendo una receta en esta pantalla se van actualizando estas las variables correspondientemente a lo que esté ejecutando el sistema en ese momento.

En esta pantalla se puede desplegar el menú principal presionando el botón MENU.

Menú Principal

En el menú principal se muestran botones que llevan hacia una pantalla de control, programación o inicio del proceso.

Los botones del menú son los siguientes:

Recetas: Despliega una pantalla en la que se puede escoger o programar una receta.

Control Servomotores: Despliega la pantalla para el movimiento manual de los servomotores de M1 a M13.

Motor de Arrastre: Leva hacia una pantalla para controlar el arrastre de la lámina de material

Empezar proceso: Despliega la pantalla principal y empieza a correr la receta seleccionada.

Control Mesa/Rodillo: Lleva a una pantalla para el control manual del rodillo de arrastre y de la mesa de entrada a la troqueladora.

Bloquear Máquina: Despliega la pantalla de ingreso de contraseña para proteger el sistema

Cerrar: Cierra el menú y se devuelve a la pantalla principal

Recetas

Cuando se ingresa a la pantalla de recetas desde el menú principal se puede presionar el botón de seleccionar o de programar recetas. Para seleccionar una receta solamente se presionan las flechas hacia la derecha o izquierda para aumentar o disminuir el número de receta, esto para escoger la receta a correr o programar.

En la pantalla de programación de recetas se debe tomar en cuenta:

1. El ingreso de datos desde el teclado se hace de la misma forma que en la pantalla de ingreso de contraseña.
2. Se debe empezar a programar la receta seleccionando el número 1 en la variable Agujeros utilizando las flechas hacia la derecha o izquierda.
3. En el campo X, se debe ingresar la distancia en milímetros que se requiere que se desplace la lámina antes de hacer el agujero.
4. En el campo Y, se debe ingresar la distancia en milímetros a la cual va a llegar el troquel en la lámina.
5. En el campo P, se ingresa el número de pistón que se quiere que se desplace y haga el agujero, de 1 a 10.
6. En el campo V, se ingresa la velocidad de perforación requerida en mm/s, de 1 a 10
7. Se presiona el botón OK para guardar la contraseña.

Control Servomotores

Esta pantalla se utiliza para mover manualmente cada uno de los servomotores de M1 a M13 y para calibrar la máquina antes de empezar una receta.

El control del teclado se hace igual que en la pantalla de ingreso de contraseña, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

1. Se debe seleccionar con las flechas a la derecha o izquierda el número de motor, de 1 a 13, que se desea controlar.
2. Se ingresa la distancia absoluta a mover el motor en milímetros.
3. Se presiona el botón Ir, para que el motor se desplace.
4. Si se quiere calibrar se debe presionar el botón Home.

Motor de Arrastre

Esta pantalla se utiliza para mover manualmente la lámina de material en un sentido. Los pasos siguientes deben ser tomados en cuenta:

1. Primeramente, el rodillo debe estar prensando la lámina, para accionarlo se debe ingresar al menú Control Mesa/Rodillo.
2. Se debe ingresar la distancia en milímetros que se requiere desplazar la lámina.
3. Se presiona el botón Ir para empezar el movimiento.

Empezar Proceso

Con este botón se empieza a correr la receta seleccionada. El usuario debe asegurarse de que los servomotores que se vayan a utilizar estén calibrados y que haya material cargado en la máquina.

Cuando se halla iniciado el proceso, es posible pausar la ejecución de este presionando el botón pausa. Cuando el sistema esté en pausa se puede resumir retomando la posición donde se encontraba antes de la pausa o abortar la ejecución de la receta.

Advertencia: Si se decide abortar el proceso, se va a perder una porción de material.

Control Mesa/Rodillo

Esta pantalla se utiliza para accionar manualmente el rodillo de arrastre de la lámina.

El usuario debe presionar el botón Alzar o Bajar para tener control del rodillo, cuando se desee salir de la pantalla se debe presionar el botón Salir.

Bloquear menú

Cuando se presiona ese menú se despliega la pantalla de ingreso de contraseña para proteger el sistema y que no pueda ser comandado por personas ajenas al control de la máquina.

Cuando la máquina es bloqueada el proceso sigue ejecutándose de la misma forma, sin embargo no se puede tener control sobre éste hasta que se ingrese la contraseña.

Errores

Si la máquina llega a desplegar un error en un servomotor no se puede empezar el proceso, se debe hacer lo siguiente:

1. Hacer una revisión en el panel de control del sistema y cerciorarse que todos los controladores tienen suministro de energía eléctrica.
2. Revisar en el panel que los cables de comunicación de los servomotores estén conectados y sujetos fuertemente, se deben conectar todos los motores, si se encontrara un problema de estos, para que la máquina pueda funcionar.
3. Apagar el control de toda máquina y volver a arrancar, intentar de nuevo iniciar el proceso.
4. Si los el error persiste, se debe identificar el controlador que está produciendo el fallo, una luz roja se enciende en el controlador con problemas (controladores BAI) o bien un código del error se despliega en una pantalla (controlador Indramat).
5. Llamar a personal técnico para darle mantenimiento a la máquina y proporcionar el código leído en el controlador.

A.3 Protocolos de medición

Movimiento de los motores en dirección de y

El procedimiento para medir la precisión de los motores de M1 a M13 fue el siguiente:

1. Se enviaron uno a uno, todos los motores a Home y se midió la distancia entre un punto fijo de la máquina y un punto de la estructura móvil.
2. Se enviaron uno a uno, todos los motores a mover a la posición 5mm, se tomaron mediciones con respecto al punto fijo de la máquina.
3. Se enviaron uno a uno, todos los motores a mover a la posición 20mm, se tomaron mediciones.
4. Se enviaron uno a uno, todos los motores a mover a la posición 50mm, se tomaron mediciones.
5. Se enviaron uno a uno, todos los motores a mover a la posición 100mm, se tomaron mediciones.
6. Se enviaron uno a uno, todos los motores a mover hasta el punto de carrera máximo de la estructura, se tomaron mediciones.

Se repitió la prueba varias veces y se tomó nota del error máximo que existía en los desplazamientos de las estructuras móviles.

Movimiento de los motores en dirección de x

El procedimiento seguido para hacer pruebas de precisión al motor de arrastre de la lámina fue el siguiente:

1. Para esto se utilizó un pedazo de material y se colocó sobre la mesa de la troqueladora.

2. Se bajó el rodillo que prensa la lámina.
3. Se ajustó las mesas guía de manera que la lámina no tuviera movimiento en la dirección de y.
4. La velocidad máxima del motor se ajustó a 20000mm/min.
5. La aceleración y desaceleración máxima del motor se ajustó a 600mm/s^2 .
6. Se hizo una marca en la lámina y en la mesa, se envió a mover el motor una distancia de 50mm.
7. Se repitió el punto 6, cinco veces y se determinó la media de los movimientos, se tomó nota del error.
8. Se repitió el punto 7 para distancias de 200mm, 500mm, 1000mm, 2000mm y 3000mm.

Obtención del gráfico del golpe del pistón

Utilizando el software RSLogix 500 se hizo lo siguiente.

1. Se configuraron los módulos analógicos del sistema.
2. Se escaló el valor de los datos obtenidos de las entradas analógicas de manera que: 0 equivaliera a 0mm y 16383 equivaliera a 50mm.
3. Los datos escalados se guardaron en variables tipo flotantes.
4. Se utilizó la herramienta trend del software RSLogix500.
5. Se configuraron las escalas en x y y.
6. Se agregó la variable escalada al trend, arrastrándola con el puntero.
7. Se corrió el accionamiento del pistón monitoreado en la variable.
8. Se tomó una impresión de pantalla y recortó utilizando el software MS Paint.

Corrida de la receta de prueba

1. Se calibraron los servocontroladores de los motores de M1 a M13.
2. Se programó la receta utilizando la pantalla de programación de recetas en el HMI.
3. Se utilizó un pedazo de material y se colocó sobre la mesa de la troqueladora.
4. Se bajó el rodillo que prensa la lámina.
5. Se ajustó las mesas guía de manera que la lámina no tuviera movimiento en la dirección de y.
6. Se presionó el botón “empezar proceso” del menú de troquelado del HMI.
7. Se esperó a que se hicieran los huecos de la receta.
8. Se sacó la lámina, se midieron las distancias entre agujeros para la dirección en x, y se midieron los desplazamientos en y tomando como partida el primer agujero hecho.

Anexos

Anexo B1: Especificaciones eléctricas del PLC SLC5/04

Processor General Specifications

The table below lists general specifications for SLC 500 modular processors.

Attribute (1747-)	SLC 5/01		SLC 5/02	SLC 5/03			SLC 5/04			SLC 5/05		
	L511	L514	L524	L531	L532	L533	L541	L542	L543	L551	L552	L553
Program memory (words)	1 K	4 K	4 K	8 K	16 K	32 K	16 K	32 K	64 K	16 K	32 K	64 K
I/O capacity	3940 discrete		4096 discrete									
Remote I/O capacity	Not applicable		Processor memory and chassis power limit up to 4096 inputs and 4096 outputs									
Chassis/slots, max	3 Chassis/30 Slots of I/O											
Standard RAM	Capacitor - 2 weeks ⁽²⁾ optional lithium battery - 5 years Lithium battery 2 years Capacitor - 30 minutes minimum											
Memory back-up options	EEPROM			Flash EPROM								
Status indicators	Run CPU Fault Forced I/O Battery Low		Run CPU Fault Forced I/O Battery Low COMM	Run CPU Fault Forced I/O Battery Low RS-232 DH-485			Run CPU Fault Forced I/O Battery Low RS-232 DH+			Run CPU Fault Forced I/O Battery Low RS-232 Ethernet		
Power supply loading	90 mA at 5V dc		500 mA at 5V dc			1A at 5V dc			1A at 5V dc			
	0 mA at 24V dc		175 mA at 24V dc			0 mA at 24V dc ⁽⁴⁾			0 mA at 24V dc			
Clock/calendar accuracy ⁽¹⁾	Not applicable			±54 sec./month at 25 °C (77 °F); ±81 sec./month at 60 °C (140 °F)								
Program scan hold-up time after loss of power	20 ms...3 s (dependent on power supply loading)											
Noise immunity	NEMA Standard ICS 2-230											
Temperature rating	operating: 0 °C...60 °C (32 °F...140°F); storage: -40 °C...85 °C (-40 °F...185 °F)											
Humidity	5 to 95% without condensation											
Shock, operating	30 g											
Vibration	Displacement: 0.15 in., peak-to-peak at 5...57 Hz											
	Acceleration: 2.5 g at 57...2000 Hz											

Anexo B2: Especificaciones del HMI 520M-006

Appendix A - Specifications

HMI520

Mechanical

Material: Plastic PBT & PC housing with polyester overlay & neoprene gasket
Mounting: Panel, 1/8 inch [3.2mm] nominal thickness
Wiring: Two 9-position shielded D-sub serial communications connectors plus power connector and one RJ-45 Ethernet Port
(HMI520M does not have Ethernet port)
Weight: 1.8 pounds [0.8 kg]

Environmental

Protection: Sealed to NEMA 4/12 (IP65) when properly panel mounted (O-ring seal)
Operating Temperature: +32 to +113° F [0 to 45° C]
Storage Temperature: -4 to +140° F [-20 to 60° C]
Operating Humidity: 10-90% RH (non-condensing)

Electrical Noise Emissions and Immunity

Emissions: EN55011 (Group 1, Class B)--Generic commercial, light & heavy industrial environments
EN50081-1 Generic domestic and light industrial environments
EN50081-2 Generic heavy industrial environments
Immunity: EN50082-1 Generic domestic and light industrial environments
EN50082-2 Generic heavy industrial environments

Power Requirements

Input Voltage: 24 VDC \pm 5%
Input Current: 2 amp instantaneous, 500 milliamps continuous

Display

Type: Liquid Crystal Display (LCD), 320 x 240 pixels or 240 x 320
Size: 5.7 inches [145mm] diagonal
Backlight: CCFL with 15,000 hour minimum lifespan (mono version)
25,000 hour minimum lifespan (color version)
HMI520M: 4-shade blue-mode STN, 60 cd/m², 15:1 contrast
HMI520C: 256-color STN, 150 cd/m², 30:1 contrast
HMI520H: 256-color TFT, 300 cd/m², 100:1 contrast

Touchscreen

Type: 4-wire analog resistive
Touch Accuracy: 0.04 inches [1.5 mm] resolution
Surface Hardness: 4H6

Communications

Serial ports: Port 1 is RS-232 communications to PLC (DE9S)
Port 2 is RS-485 communications to PLC and RS-232 PC configuration (DE9P)
Baud Rates: 9600, 19200, 38400, 57600, 115200
Type: Point-to-point serial communications
Ethernet port: 10BaseT supporting the Modbus TCP/IP protocol (Ethernet not available on HMI520M)

Internal Features

Microprocessor: 200 MHz Intel XScale
Recipe and real-time clock module
Memory: 4MB DRAM, 1MB flash (HMI520M) or 2 MB flash (HMI520 & HMI520H), 128 KB recipe
Compact Flash: Standard on all models except for HMI520M

Anexo B3: Especificaciones eléctricas del servocontrolador Indramat ECODrive03 DKC11.3-100-7-FW

Mains connections, Power section DKC.3-040-7-FW and DKC**.3-100-7-FW**

Designation	Symbol	Unit	DKC**.3-040-7-FW		DKC**.3-100-7-FW	
Operating mode at the mains			single phase	three phase	single phase	three phase
Mains input voltage	U_{N1}	V	1 x AC (200 ... 480) ± 10%	3 x AC	1 x AC (200 ... 480) ± 10%	3 x AC
Mains frequency	f_{N1}	Hz	(50 ... 60) ± 2			
Rotary field			clockwise or counter-clockwise			
Connected load	S_{N1}	kVA	see page 11-1: "Mains Connections"			
Nominal charging current (dependent on mains input voltage)	I_{EIN1}	A	5 ... 12		12 ... 28	
Soft-start resistor	$R_{Softstart}$	Ohm	60		24	
Continuous power soft-start resistor	$P_{Softstart}$	kW	0.15 ²⁾		0.5 ³⁾	
Switching frequency (selectable)	f_S	kHz	4 or 8			
Type current = peak current 1	I_{PEAK1}	A	40 ¹⁾		100 ¹⁾	
Peak current 2 for $f_S = 4$ kHz	$I_{PEAK2(4kHz)}$	A	16 ¹⁾		40 ¹⁾	
Peak current 2 for $f_S = 8$ kHz	$I_{PEAK2(8kHz)}$	A	12.5 ¹⁾		32 ¹⁾	
Continuous current 1 for $f_S = 4$ kHz	$I_{CONT1(4kHz)}$	A	13 ¹⁾		32 ¹⁾	
Continuous current 2 for $f_S = 4$ kHz	$I_{CONT2(4kHz)}$	A	16 ¹⁾		40 ¹⁾	
Continuous current 1 for $f_S = 8$ kHz	$I_{CONT1(8kHz)}$	A	9 ¹⁾		21 ¹⁾	
Continuous current 2 for $f_S = 8$ kHz	$I_{CONT2(8kHz)}$	A	12.5 ¹⁾		32 ¹⁾	
Max. output frequency at $f_S=4$ kHz	f_{out}	Hz	400		400	
Max. output frequency at $f_S=8$ kHz	f_{out}	Hz	800		800	
Device power dissipation without internal continuous bleeder power for I_{CONT2}	P_V	W	180		420 (see page 12-1: "Power dissipation")	
Peak bleeder power DKC when $U_{ZW} = 850$ V for permissible load cycle	P_{BS}	kW	10 0.5 s on, 33 s off		120 0.25 s on, 60 s off	
Continuous bleeder power DKC when $T_a \leq 45$ °C under max. temperature range with distance	P_{BD}	kW	0.15		0.5	
	ΔT d	K mm	28 80		150 80	
Max. energy dissipation	$W_{R,MAX}$	kWs	5.0		31	
Max. DC bus charge	W_{MAX}	kWs	5.0		31	
Internal DC bus dynamic brake (ZKS)			not present		present	
Resistor for ZKS	R_{ZKS}	Ohm	not present		6	
Storable energy of the DC bus capacitors	W_{ZW}	Ws	see diagrams page 4-17: "Storable energy in the bus"			
Nominal DC bus capacitance DKC	C_{ZW}	mF	0.27 ±20%		0.675 ±20%	
DC bus voltage (dependent on mains input voltage)	U_{ZW}	V	DC 300 ... 800			
DC bus continuous power (dependent on mains input voltage)	P_{ZWD}		see diagrams page 4-28 "Allowed DC bus continuous power"			

Anexo B4: Especificaciones eléctricas del servocontrolador Aerotech BA Intellidrive. BAI20

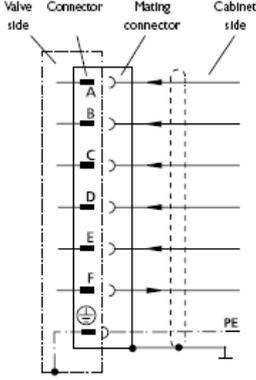
Model	Units	BAI10	BAI20	BAI30
Output Voltage (brushless)	VDC	40 to 320 ¹		
Input Voltage	VAC	28 to 240 ¹		
Peak Output Current	A(peak)	10	20	30
Continuous Output Current	A(peak)	5	10	15
Peak Power Output	Watts	2720	5440	8160
Continuous Power Output	Watts	1360	2720	4080
Power Amplifier Bandwidth	kHz	1		
PWM Switching Frequency	kHz	20		
Minimum Load Inductance	mH	8		
Operating Temperature	deg C°	0 to 50		
Storage Temperature	deg C°	-30 to 85		
Weight	lb (kg)	2.5 (1.1)		
Controller Section				
Microprocessor	16-bit 80C166			
Servo Update Rate	1 to 4 kHz			
Clock Speed	20 MHz			
Command Set	Two character nuemonics			
Length of Program	Up to 5k bytes			
Operating Modes	Indexer, Clk/Dir, Teach			
Maximum Clock Input Rate	1MHz			
Move Types	Index, Free-running, Homing			
Programmable Inputs	3			
Programmable Outputs	3			
Standard Outputs	Fault			
Standard Inputs	Enable			

¹ The input and output voltages require different units, consult the factory for more information.

Anexo B5: Especificaciones eléctricas de la electroválvula proporcional MOOG-D661-1962E

Connector Wiring - Type code **S** (see sticker on the electronics housing)

For valve with 6+PE-pole connector according DIN 43563, connector (metal) with leading ground pin (\perp).



Function	Voltage command	Current command
Supply	+ 15VDC \pm 3%, ripple <50 mV _{pp}	
Supply	- 15VDC \pm 3%, ripple <50 mV _{pp}	
Supply/signal ground	\perp (0V)	
Input command valve flow	0 to \pm 10V Input resistance 100 k Ω	0 to \pm 10 mA Load resistance 400 Ω
Input inverted command valve flow	0 to \pm 10V Input resistance 100 k Ω	0 to \pm 10 mA Load resistance 400 Ω
Output actual value spool position	0 to \pm 10V Output resistance 10 k Ω	0 to \pm 10 mA Load resistance max. 500 Ω
Protective ground		

¹⁾ Valves having code letter X at position 10 of type designation: Command signal 10 mA between pins D and E (differentially, internal resistance 1 k Ω).

Anexo B6: Especificaciones eléctricas del transductor Balluff BTL5-A21-MM0050-B-532



BTL5-A/C/E/G__-M____-B/Z-S32/KA__
Micropulse Linear Position Transducer
Analog Output-Rod Style

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
B	T	L	-	5	-	A	1	1	-	M	0	3	0	5	-	Z	-	S	3	2	-
																		K	A	0	5

Balluff - Linear Transducer _____

Generation 5 _____

Output Type _____

A = 0 to 10Vdc
 B = -5 to +5Vdc
 C = 0 to 20 mA
 E = 4 to 20 mA
 G = -10 to +10 Vdc

Supply Voltage _____

1 = 24 Vdc ±20%
 2 = ±16 Vdc ±2%

Analog Output Operation _____

Voltage type (Output type A, B & G)
 1 = User selectable rising or falling
 Current type (Output type C & E)
 0 = Minimum output at connector end (rising towards opposite end)
 7 = Maximum output at connector end (falling towards opposite end)

Normal Stroke Length _____

0	8	0	5
---	---	---	---

 = 305mm active stroke

Housing Type _____

Z = Standard Rod Style (3/4"x16-UNF mounting threads and 50.8mm null zone)
 B = Metric Rod Style (M18x1.5 mounting threads and 30mm null zone)

Connection Type _____

8	8	2
---	---	---

 = 8-pin quick disconnect metal connector

K	A	0	5
---	---	---	---

 = Cable out (5m standard; specify length in meters)

Standard Stroke Lengths (consult factory for additional lengths)

Electrical Stroke

inches	mm	inches	mm	inches	mm	inches	mm
2	0051	13	0330	40	1016	142	3606
3	0077	15	0381	42	1067	148	3759
3.5	0090	16	0407	48	1220	156	3962
4	0102	18	0457	50	1270		
5	0127	20	0508	60	1524		
6	0152	22	0560	70	1778		
7	0178	24	0610	80	2032		
8	0203	26	0661	90	2286		
9	0230	28	0711	100	2540		
10	0254	30	0762	110	2794		
11	0280	32	0813	120	3048		
12	0305	36	0914	130	3302		

Anexo B7: Dibujos de la máquina troqueladora

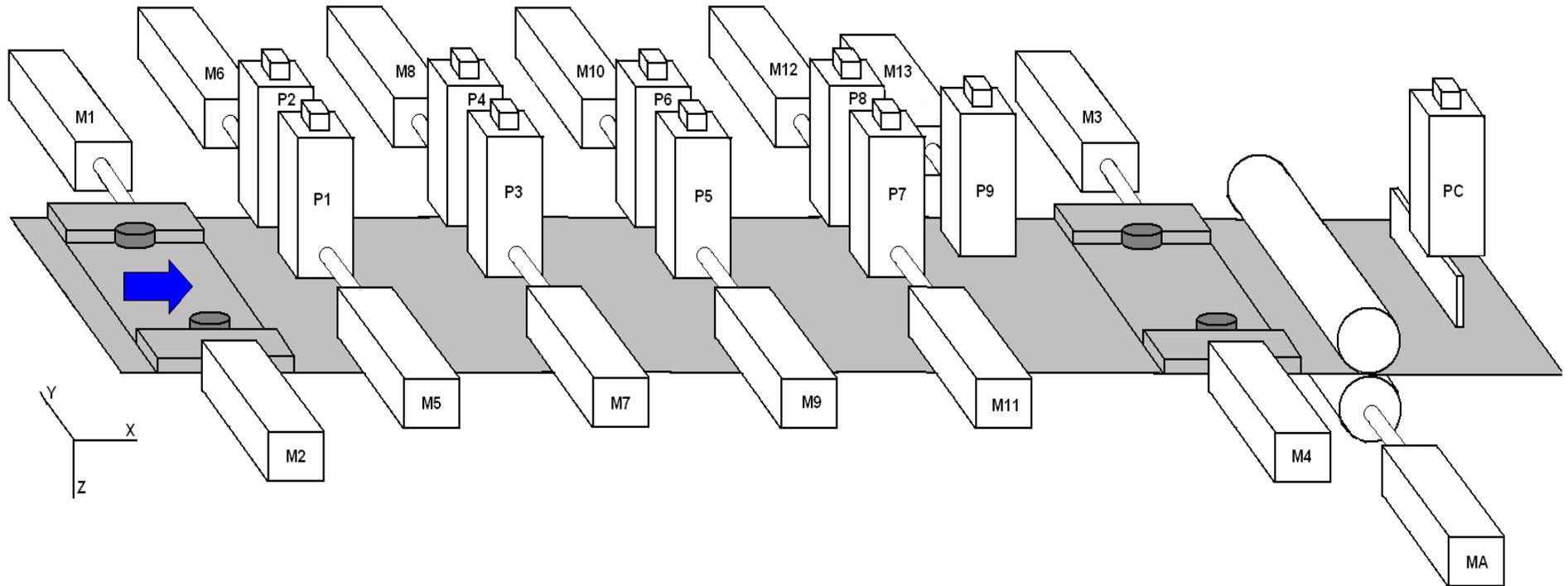
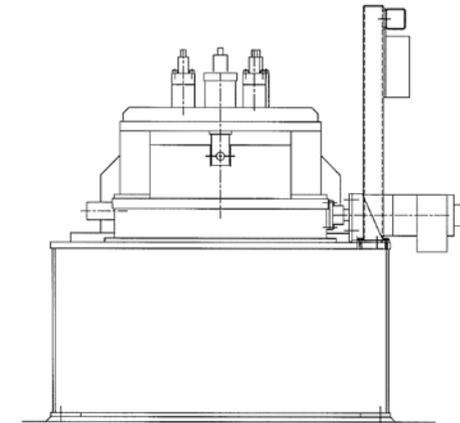
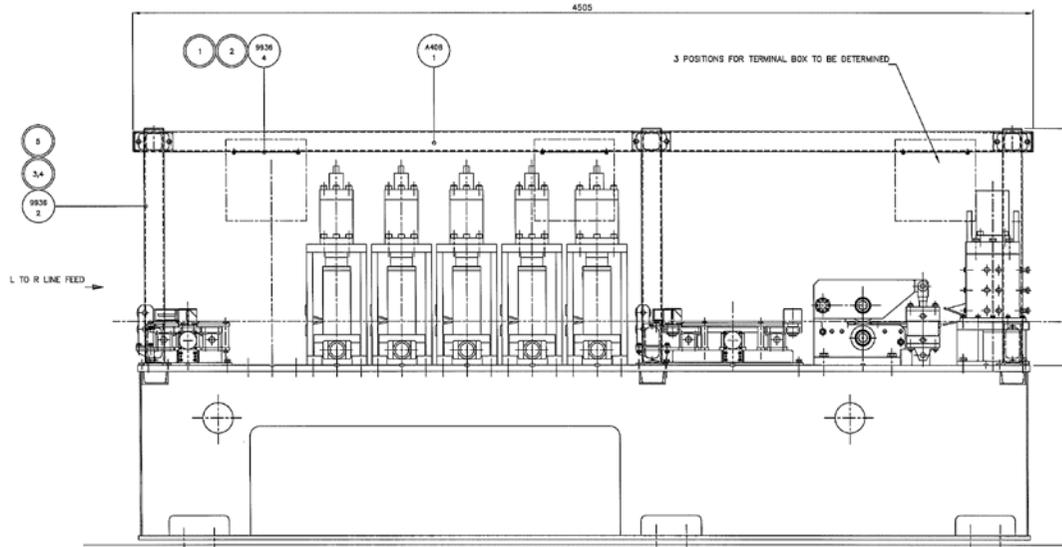
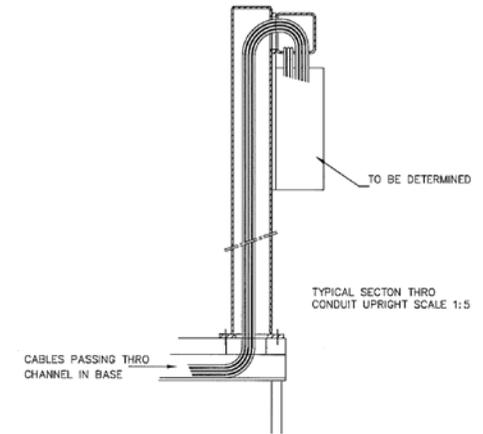
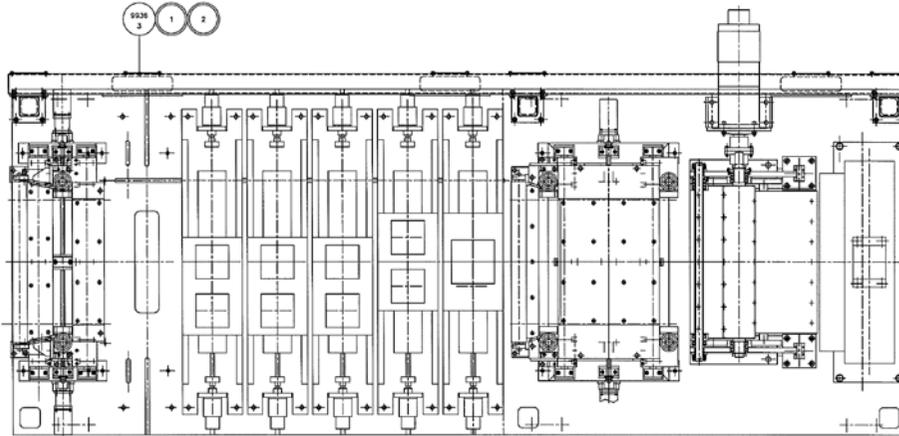


Figura 3.5 Esquema de la máquina troqueladora.
La flecha indica la dirección de movimiento de la chapa.

DO NOT SCALE

THIRD ANGLE PROJECTION



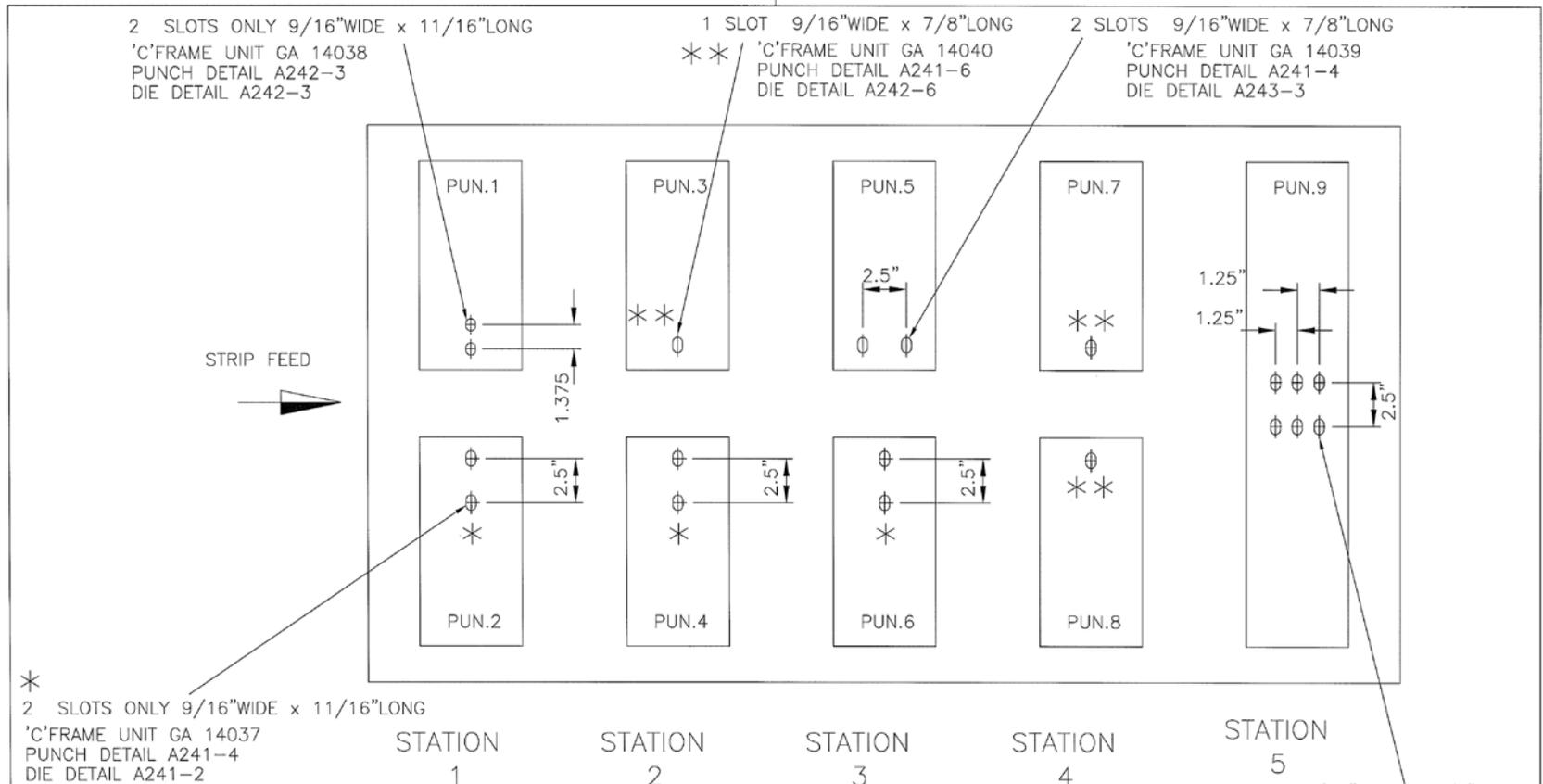
BRONX PROCESS ENG. LTD - METFORM DIVISION
 Dudley Road, Littlebury, Essex, UK
 Telephone: 0204 803277 Fax: 0204 803277 Telex: 230800 BRONX G

TITLE
**CABLE CONDUIT
 PUNCH BASE**

SCALE	1:7.5	TRADE MARKS	AS SHOWN
DESIGN	DA/S	FINISHES	AS SHOWN
DATE	23/07/79	STRAIGHTENING	AS SHOWN
DRAWN	DA/S	DRILLING	AS SHOWN
CHECKED	DA/S	GRINDING	AS SHOWN

REVISIONS	NO.	DATE	BY	CHKD.

DRAWING NUMBER	14112
ORDER NUMBER	



*
 2 SLOTS ONLY 9/16" WIDE x 11/16" LONG
 'C'FRAME UNIT GA 14037
 PUNCH DETAIL A241-4
 DIE DETAIL A241-2

STATION 5
 6 SLOTS 9/16" WIDE x 7/8" LONG
 'C'FRAME UNIT GA 13945
 PUNCH DETAIL A071-3
 DIE DETAIL A071-2

DATE	REV	REVISION

MATERIAL		FABRICATION TOLERANCES	
WEIGHT		UP TO 500mm = ±1mm, 500 TO 1000mm = ±2mm 1000mm & ABOVE = ± 3mm WELD SYMBOLS TO B.S.499	
SURFACE FINISHES MICRONS C.L.A		MACHINING TOLERANCES	
ROUGH M/C	6.3/√	UP TO 500mm ±0.5mm, ABOVE 500mm ±1.0mm	FLATNESS TOL [Z]0.1 ANGULARITY TOL [Z]0.1
STANDARD	3.2/√	ALL OTHERS AS STATED ON DRAWING.	
FINE	1.6/√	SCREW THREADS TO BS.3643 TOL. CLASS 6g AND 6h	
GRIND	0.8/√	DEBURR ALL SHARP CORNERS. AVOID UNDERCUTS.	

THE BRONX ENGINEERING CO. LTD.
 LYE, STOURBRIDGE
 WEST MIDLANDS, DY9 8DS, ENGLAND.

metform

© BRONX ENGINEERING. This drawing and copyright in it are our property. This drawing is loaned subject to return on demand and it must not be copied, reproduced or communicated to any third party without written consent or used directly or indirectly for any purpose detrimental to our interest.

SCALE	unknown	DATE	WARNING : DO NOT SCALE	
DRAWN	PAC	4/19/00	 THIRD ANGLE PROJECTION	A3
CHECKED				
APPROVED				
TITLE		TAKEN FROM DRG. No.		
PUNCH AND DIE POSITIONS		CUSTOMER DRG No.		
MACHINE				
DIGITAL SOFT PUNCH 2000				
SUB-ASSY				
PLANT		SHEET NUMBER	BRONX DRAWING No.	REV
PURLIN LINE		1 of 1	300088	0