



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

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y**

**TELECOMUNICACIONES**

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

**CONTROL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**

**DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**TEMA: REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA CNC DE EMPAQUES DE**

**POLIURETANO PARA TABLEROS ELÉCTRICOS DE LA EMPRESA**

**SICAL INGENIERÍA**

**AUTORES: ALVARADO VITERI, JHOSSET ENRIQUE**

**TARAPUEZ RAMOS, JONATHAN EDUARDO**

**DIRECTOR: ING. PROAÑO ROSERO, VÍCTOR GONZALO MSc.**

**SANGOLQUÍ**

**2019**



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, ***“REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA CNC DE EMPAQUES DE POLIURETANO PARA TABLEROS ELÉCTRICOS DE LA EMPRESA SICAL INGENIERÍA”*** realizado por los señores Alvarado Viteri Jhosset Enrique y Tarapuez Ramos Jonathan Eduardo el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, diciembre de 2019

Ing. Víctor Gonzalo Proaño Rosero MSc.

Director



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, Alvarado Viteri Jhosset Enrique y Tarapuez Ramos Jonathan Eduardo declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación “REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA CNC DE EMPAQUES DE POLIURETANO PARA TABLEROS ELÉCTRICOS DE LA EMPRESA SICAL INGENIERÍA” es de nuestra autoría y responsabilidad. Cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, diciembre 2019

Jhosset Enrique Alvarado Viteri

C. C 172311868-1

Jonathan Eduardo Tarapuez Ramos

C. C 172343976-4



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros Alvarado Viteri Jhosset Enrique y Tarapuez Ramos Jonathan Eduardo autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en la biblioteca virtual de la institución la publicación del proyecto de grado titulado: "REPOTENCIACIÓN DE LA MÁQUINA CNC DE EMPAQUES DE POLIURETANO PARA TABLEROS ELÉCTRICOS DE LA EMPRESA SICAL INGENIERÍA", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, diciembre 2019

-----  
Jhosset Enrique Alvarado Viteri

C. C 172311868-1

-----  
Jonathan Eduardo Tarapuez Ramos

C. C 172343976-4

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a mis padres por ser los pilares en mi vida principalmente por su amor y apoyo incondicional a pesar las situaciones que como familia nos ha tocado vivir y sin ustedes no habría podido llegar hasta aquí.

A mis familiares por todo el apoyo brindado en los momentos en los cuales los he necesitado, por sus consejos en situaciones difíciles y confianza depositados en mi desde siempre.

A mis amigos y compañeros por todas las experiencias vividas a lo largo de la vida universitaria y extenderme su mano cuando más los necesité.

*Jhosset Enrique Alvarado Viteri*

Dedico esta tesis a Dios por darme la vida y la oportunidad de estudiar la carrera que me apasiona, pues con ella voy a poder ayudar a mi prójimo y salir adelante. A mis padres, Eduardo Tarapuez y Laura Ramos, quienes me han apoyado para poder culminarla y han sido un apoyo fundamental en mi carrera.

*Jonathan Eduardo Tarapuez Ramos*

## AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la perseverancia y dedicación para finalizar con éxito esta etapa de mi vida, por brindarme las oportunidades para ser un mejor profesional.

A mis padres por su cariño, esfuerzo y ejemplo para ser una mejor persona cada día y lograr todas mis metas propuestas con trabajo constante y dedicación.

A mi tutor de tesis, quien con su experiencia y conocimiento me orientó en la elaboración del presente trabajo de investigación.

A la empresa Sical Ingeniería por abrirnos las puertas de sus instalaciones y la confianza brindada a dos jóvenes estudiantes para realizar el presente trabajo de investigación.

*Jhosset Enrique Alvarado Viteri*

Agradezco a mis maestros, en especial a mi tutor Ing. Víctor Proaño, por haberme brindado sus conocimientos y empeño, porque no solo fueron importantes en mí y esforzarme para conseguir mis metas.

A mis compañeros por su amistad y todos los momentos juntos que pasamos, los cuales me han servido de consuelo y apoyo en diversas ocasiones.

A mi familia, en especial a mis padres por todo el sacrificio que han hecho por mí en estos años, por todo el apoyo incondicional en los buenos y malos momentos, finalmente les agradezco por todos los buenos valores que me han enseñado puesto que son la razón de haber culminado con éxito mi carrera.

*Jonathan Eduardo Tarapuez Ramos*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Justificación e Importancia.....	3
1.3. Alcance del Proyecto.....	3
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo General .....	5
1.4.2. Objetivos Específicos .....	5
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>6</b>
<b>MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>6</b>

2.1. Control numérico computarizado .....	6
2.2. Máquina de tiras de poliuretano .....	7
2.2.1. Introducción .....	7
2.2.2. Fabricación de poliuretano .....	8
2.3. Lenguaje de programación .....	8
2.3.1. Estructura del lenguaje .....	9
2.3.2. Ejecución .....	10
2.3.3. Código G .....	10
2.4. Sistemas electrónicos comunes de una máquina CNC.....	11
2.4.1. Motores de desplazamiento .....	11
2.4.2. Relés .....	11
2.4.3. Contactores.....	11
2.5. Tipos de control de trayectoria.....	12
2.5.1. Control punto a punto.....	12
2.5.2. Control paraxial.....	12
2.5.3. Control interpolar o continuo .....	12
2.6. Tarjeta de control de movimiento .....	13
2.7. Mach 3.....	17
2.7.1. LazyCam .....	17

2.7.2. Screen 4 .....	18
2.8. Modbus.....	18
2.8.1. Trama del protocolo Modbus .....	19
2.8.2. Funciones del protocolo Modbus .....	20
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>26</b>
<b>INGENIERÍA BÁSICA .....</b>	<b>26</b>
3.1. Máquina CNC Donggao DG-PU20TJ.....	26
3.1.1. Subsistema motor de la herramienta .....	27
3.1.2. Subsistema neumático .....	29
3.1.3. Subsistema hidráulico .....	31
3.1.4. Subsistema de control.....	34
3.1.5. Principio de funcionamiento .....	37
3.2. Requerimientos del nuevo sistema de control.....	38
3.2.1. Diseño del empaque en software CAD .....	38
3.2.2. Control de movimiento de la herramienta.....	38
3.2.3. HMI para control local .....	38
3.2.4. Programar rutina de limpieza automática.....	39
3.2.5. Permitir diversas formas de empaque .....	39
3.2.6. Evitar taponamiento de mangueras .....	40

<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>41</b>
<b>INGENIERÍA DE DETALLE.....</b>	<b>41</b>
4.1. Arquitectura del sistema de control.....	41
4.2. Hardware y software utilizados.....	42
4.2.1. Tarjeta de control de movimiento .....	42
4.2.2. Tarjeta de comunicación paralela PCI.....	43
4.2.3. Relé inteligente Clic 02.....	44
4.2.4. Convertidor RS 485 a USB .....	45
4.2.5. Software .....	46
4.3. Programación y configuración de equipos .....	47
4.3.1. Configuración Mach 3 y tarjeta de control de movimiento.....	47
4.3.2. Programación de macros .....	55
4.3.3. Programación de relé inteligente Clic 02 .....	61
4.3.4. Configuración de comunicación Modbus.....	64
4.3.5. Programación de drives y servodrives.....	67
4.4. Diseño de la pantalla HMI.....	72
4.4.1. Distribución de elementos .....	72
4.4.2. Condiciones de operación .....	73
4.5. Gabinete de control .....	74

4.5.1. Disposición de los equipos nuevos.....	74
4.5.2. Diseño de puerta externa .....	75
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>77</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
5.1. Pruebas iniciales.....	77
5.2. Correcciones.....	80
5.3. Resultados finales.....	85
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>88</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>88</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>
ANEXO A: Manual de usuario .....	93
ANEXO B: Plan de mantenimiento preventivo .....	111
ANEXO C: Planos eléctricos, neumáticos, hidráulicos y de control .....	123

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b> <i>Características tarjeta de control de movimiento Savebase .....</i>	42
<b>Tabla 2</b> <i>Tarjeta de comunicación paralela PCI .....</i>	43
<b>Tabla 3</b> <i>Relé inteligente Clic 02.....</i>	44
<b>Tabla 4</b> <i>Convertor RS485 a USB.....</i>	46
<b>Tabla 5</b> <i>Software utilizado por el nuevo sistema de control.....</i>	47
<b>Tabla 6</b> <i>Parámetros de drive para el motor de mezclado en el cabezal.....</i>	67
<b>Tabla 7</b> <i>Parámetros de drive para bombas de poliol e isocianato.....</i>	69
<b>Tabla 8</b> <i>Parámetros de servodrives que controlan los ejes X e Y .....</i>	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Sistema de tarjeta de control de movimiento conectada a PC .....	14
<b>Figura 2.</b> Sistema de control de movimiento – tarjeta PCI.....	16
<b>Figura 3.</b> Trama de protocolo Modbus .....	19
<b>Figura 4.</b> Trama de dispositivo maestro de Modbus .....	20
<b>Figura 5.</b> Trama de dispositivo esclavo de Modbus .....	20
<b>Figura 6.</b> Código de funciones de Modbus.....	22
<b>Figura 7.</b> Convertidor Modbus ASCII en Modbus RTU .....	24
<b>Figura 8.</b> Máquina CNC Donggao DG-PU20TJ en condición original .....	26
<b>Figura 9.</b> Herramienta: Cabezal de mezcla de poliuretano.....	28
<b>Figura 10.</b> Ubicación de los sensores límite de los ejes X e Y.....	28
<b>Figura 11.</b> Compresor de aire .....	29
<b>Figura 12.</b> Unidad de mantenimiento a 70 PSI.....	30
<b>Figura 13.</b> Tanque de cloruro de metileno.....	30
<b>Figura 14.</b> Electroválvulas neumáticas.....	31
<b>Figura 15.</b> Tanques de almacenamiento de polioliol, isocianato y dicloruro .....	32
<b>Figura 16.</b> Bombas de polioliol e isocianato .....	33
<b>Figura 17.</b> Bomba de agua y resistencia calefactora .....	34
<b>Figura 18.</b> PC de control.....	35
<b>Figura 19.</b> Tarjeta de control de movimiento Donggao .....	35
<b>Figura 20.</b> Tarjeta optoacoplada 5VDC – 220VAC .....	36
<b>Figura 21.</b> Tarjeta auxiliar para puerto paralelo de 40 pines.....	36
<b>Figura 22.</b> Arquitectura del nuevo sistema de control.....	41

<b>Figura 23.</b> Tarjeta de control de movimiento Savebase .....	43
<b>Figura 24.</b> Tarjeta PCI para puerto paralelo .....	44
<b>Figura 25.</b> Relé inteligente Clic 02.....	45
<b>Figura 26.</b> Conversor RS485 a USB.....	46
<b>Figura 27.</b> Configuración de puerto paralelo en software Mach 3.....	48
<b>Figura 28.</b> Habilitación de los ejes a utilizarse (X e Y).....	49
<b>Figura 29.</b> Habilitación de señales de sensores límites de carrera de los ejes en Mach 3 .....	49
<b>Figura 30.</b> Habilitación de componentes externos en Mach 3.....	50
<b>Figura 31.</b> Configuración señales PWM en Mach 3.....	51
<b>Figura 32.</b> Configuración general de Mach 3.....	52
<b>Figura 33.</b> Configuración velocidad regreso a posición Home .....	53
<b>Figura 34.</b> Configuración del eje X en Mach 3 .....	54
<b>Figura 35.</b> Configuración del eje Y en Mach 3 .....	54
<b>Figura 36.</b> Macro tipo Brain utilizado en interfaz HMI .....	55
<b>Figura 37.</b> Elementos de la interfaz HMI que utilizan macros.....	56
<b>Figura 38.</b> Script de botón Paro de emergencia.....	57
<b>Figura 39.</b> Script de botón Posición Inicial .....	58
<b>Figura 40.</b> Script de botón Cero XY.....	58
<b>Figura 41.</b> Script de botón Home XY.....	59
<b>Figura 42.</b> Script de botón Iniciar Test.....	59
<b>Figura 43.</b> Script de botón Iniciar Limpieza.....	60
<b>Figura 44.</b> Script para activar/desactivar la simulación.....	60
<b>Figura 45.</b> Script para activar/desactivar el mezclador de cabezal.....	61

<b>Figura 46.</b> Configuración Modbus de relé Clic 02 .....	62
<b>Figura 47.</b> Configuración reloj de relé Clic 02.....	63
<b>Figura 48.</b> Corriente medida las líneas de alimentación trifásica de la máquina .....	64
<b>Figura 49.</b> Configuración comunicación Modbus – Mach 3.....	65
<b>Figura 50.</b> Configuración parámetros comunicación Modbus .....	66
<b>Figura 51.</b> Configuración Modbus Clic 02.....	67
<b>Figura 52.</b> Elementos de la pantalla HMI.....	72
<b>Figura 53.</b> Distribución interna del gabinete de control .....	75
<b>Figura 54.</b> Distribución externa del gabinete de control con los cambios realizados .....	76
<b>Figura 55.</b> Imperfecciones en el acabado del poliuretano .....	77
<b>Figura 56.</b> Vibraciones y grosor del empaque.....	78
<b>Figura 57.</b> Tramo inicial sin empaque.....	79
<b>Figura 58.</b> Residuos de poliuretano al final del empaque .....	79
<b>Figura 59.</b> Residuos de poliuretano en el compartimiento central de mezcla. ....	80
<b>Figura 60.</b> Velocidad de mezcla del cabezal .....	81
<b>Figura 61.</b> Ubicación de sensores límites de eje Z.....	81
<b>Figura 62.</b> Velocidad máxima y aceleraciones de los ejes X e Y.....	82
<b>Figura 63.</b> Configuración de la velocidad de la herramienta en LazyCam .....	82
<b>Figura 64.</b> Velocidad de movimiento definida en código G .....	83
<b>Figura 65.</b> Retardo de 250 milisegundos en post procesador de LazyCam.....	84
<b>Figura 66.</b> Macro para enviar la acumulación de residuos de empaque.....	84
<b>Figura 67.</b> Diferencia entre rutinas de limpieza .....	85
<b>Figura 68.</b> Resultados del empaque final .....	86

<b>Figura 69.</b> Resultados de empaque en 12 tableros de control .....	86
<b>Figura 70.</b> Resultados del empaque en gabinete inoxidable.....	87
<b>Figura 71.</b> Empaque en puertas frontales, laterales y traseras de gabinete de distribución .....	87

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación consiste en la repotenciación de una máquina CNC de empaques de poliuretano para tableros eléctricos, la cual utiliza una tarjeta controladora de movimiento de propósito general con su respectiva interfaz de usuario. Esta máquina CNC está conformada por cuatro subsistemas principales: subsistema motor de la herramienta, subsistema neumático, subsistema hidráulico y subsistema de control. El subsistema motor de la herramienta es el encargado del movimiento de los ejes X, Y y Z de la máquina. El subsistema neumático está conformado por un compresor, regulador de presión y filtro, con la finalidad que el aire limpie los conductos de la máquina de los residuos que se encuentren en los conductos. El subsistema hidráulico traslada los químicos necesarios (poliol e isocianato) para su mezclado en la herramienta de la máquina, además la herramienta posee una línea de recirculación para generar la menor cantidad de desperdicio de los químicos y poder reutilizarlos. El subsistema de control conformado por un computador como unidad de procesamiento, un puerto paralelo que lleva las señales de control desde la CPU hacia los actuadores y una tarjeta de control de movimiento la cual está gobernada por su respectivo software.

La trayectoria del material del empaque se dibuja en Autocad el cual genera un archivo (.dxf). Se seleccionó el programa Lazycam para traducir el esquema en lenguaje CAM que es interpretado por el software Mach3 de la tarjeta controladora.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **CONTROL DE MOVIMIENTO**
- **MODBUS**
- **CNC**

## **ABSTRACT**

The present work consists in the repowering of a CNC machine for polyurethane packaging for electrical panels, which uses a general purpose motion controller card with its respective user interface. This CNC machine is made up of four main subsystems: tool movement subsystem, pneumatic subsystem, hydraulic subsystem and control subsystem. The tool movement subsystem of the tool is responsible for the movement of the X, Y and Z axes of the machine. The pneumatic subsystem is made up of a compressor, pressure regulator and filter, so that the air cleans the residues left in the machine ducts. The hydraulic subsystem transfers the necessary chemicals (polyol and isocyanate) for mixing in the machine, the tool also has a recirculation line to generate the least amount of chemical waste and reuse it. The control subsystem has a computer as a processing unit, a parallel port that carry the control signals from the CPU to the actuators and a motion control card which is governed by its respective software. The trajectory of the packing material is drawn in Autocad which generates a file (.dxf). The Lazycam program was selected to translate the scheme into CAM language that is interpreted by the controller card software Mach3.

### **KEYWORDS:**

- **MOTION CONTROL**
- **MODBUS**
- **CNC**

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Antecedentes

La elaboración de tableros eléctricos es una de las principales actividades dentro del taller de la empresa Sical Ingeniería, donde se diseñan desde cero en tres fases como corte, pulido y pintura tanto de la estructura interna como de las puertas y sus acabados. En el proceso de ensamblaje de los tableros eléctricos se necesita recubrir el perfil de las puertas con tiras de poliuretano lo cual sirve como protección ante el ingreso de polvo y agua. Para el proceso de acabado de los tableros, la empresa adquirió en el 2016 una máquina CNC de tiras de poliuretano de la marca Donggao, modelo DG- PU20TJ desde China. La puesta en marcha de la máquina la realizaron ingenieros extranjeros.

La máquina estuvo operativa durante aproximadamente 7 meses dentro del taller metal-mecánico de la empresa. En el 2017, la empresa realizó un traslado de la máquina con fines de mejorar la distribución de los equipos y optimizar el espacio físico; sin embargo, al reconectar la máquina se tuvo problemas durante la puesta en marcha donde se detectó movimientos imprecisos de los ejes y aparente daño en algunos componentes del tablero de control, por lo que la operación de la máquina quedó suspendida.

La máquina CNC de tiras de sellado DG-PU29TJ, se utiliza para realizar diferentes contornos en base al poliuretano, los cuales se utilizan como empaques de protección para tableros eléctricos.

El proceso básico que realiza la máquina consiste en la mezcla de 2 químicos: poliol e isocianato que se combinan para producir el poliuretano. Los químicos están almacenados en

tanques contenedores y son bombeados a través de mangueras hasta la herramienta de la máquina- La herramienta es un dosificador que mezcla ambos químicos y vierte el material resultante (poliuretano) según la figura deseada. Después de cada proceso, la máquina bombea un químico (Dicloruro de Metano) para la limpieza de la herramienta.

La máquina de tiras de poliuretano DG-PU29TJ es del tipo CNC (Control Numérico Computarizado), utiliza un computador como procesador central, el cual ejerce el control sobre el movimiento de la máquina. El propósito es controlar los motores acoplados a los ejes de movimiento de la herramienta. El trayecto de la herramienta está definido por un diseño en archivo .dwg (Autocad), el cual es compilado por un programa desarrollado por el fabricante.

El personal de la empresa indica que entre los principales inconvenientes que posee la máquina se tiene que la tarjeta controladora del movimiento de los ejes sufre fallas en la comunicación con el software de control. Este software consiste en una interfaz de interacción con el usuario donde se define el modelo del empaque para el funcionamiento en modo automático y también se puede controlar el movimiento de la herramienta de forma manual.

Adicionalmente, desde el inicio de operación de la máquina se ha tenido un problema con los químicos utilizados para las tiras de sellado, y es que, al circular por las mangueras, parte del material queda dentro y se endurece lo que a la final taponan las mangueras de circulación y es necesario su reemplazo. Por parte de la empresa, se requiere cambiar el sistema de control de la máquina de forma que se pueda prescindir de los servicios del fabricante original y se pueda tener repuestos de forma más accesible en el país. Esto involucra cambiar la tarjeta controladora de

movimiento y programar una nueva interfaz de usuario para el control del proceso. Además de diseñar e implementar un sistema de recirculación para evitar el taponamiento de las mangueras.

## **1.2. Justificación e Importancia.**

La realización del presente proyecto se sustenta en solventar la necesidad de la empresa Sical Ingeniería de generar sus propios empaques de protección para tableros eléctricos. Esta labor se traduce en una mayor calidad y mejor presentación de sus productos. También abarata costos al prescindir de proveedores de empaques de poliuretano y el acabado de los tableros se vuelve un proceso mucho más rápido y efectivo.

Con el diseño de un nuevo sistema de control se puede tener una comprensión más profunda de los diferentes procesos que realiza la máquina, además que hace más fácil la compra y reemplazo de repuestos en caso de daños en los componentes.

Finalmente, automatizar las tareas manuales necesarias para la operación de la máquina, como la apertura y cierre de válvulas manuales, ayuda a reducir en gran medida los errores humanos en la puesta en marcha de la máquina. En cuanto al mezclado de los químicos es importante automatizar el proceso para evitar el endurecimiento de los materiales y la posterior limpieza manual por parte del personal encargado.

## **1.3. Alcance del Proyecto.**

El presente proyecto plantea la repotenciación de la máquina CNC de empaques de poliuretano (DG-PU29TJ) para tableros eléctricos de la empresa Sical Ingeniería. El propósito es prescindir de los servicios de soporte técnico del fabricante que son muy costosos e ineficientes y facilitar la adquisición de repuestos.

Primero, de cada subsistema se realizará una revisión de todos sus componentes y conexiones. De esta manera se puede obtener un entendimiento más completo sobre el modo de funcionamiento de cada subsistema, así como sus condiciones de operación (encendido, apagado, fallas).

Segundo, una vez analizado el funcionamiento de cada subsistema se implementará un nuevo sistema de control con una tarjeta controladora de movimiento con su respectivo software para el usuario que permita prescindir del soporte del fabricante y facilitar la adquisición de los repuestos.

Tercero, se implementará una interfaz para el usuario que le permita operar la máquina para prescindir del software propietario del fabricante.

Cuarto, se optimizará el funcionamiento de la máquina mediante la recirculación de los materiales por las mangueras. De esta manera se evita que el material se endurezca y tape las mangueras lo cual mejora el proceso y genera un ahorro en repuestos de mangueras, las cuales actualmente quedan inservibles después de algunas puestas en marcha de la máquina.

Quinto, se automatizará las tareas repetitivas que necesitan la intervención del operador para evitar errores humanos en el momento de la puesta en marcha y funcionamiento de la máquina. En este apartado se debe automatizar de forma puntual los procesos de apertura/cierre de válvulas y mezcla periódica de los materiales químicos que se utilizan (poliol e isocianato).

Finalmente, se elaborará todos los planos finales de cada subsistema y documentación como manual de operación y plan de mantenimiento para la máquina.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

- Repotenciar el funcionamiento de la máquina CNC de empaques de poliuretano para tableros eléctricos de la empresa Sical Ingeniería.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Diseñar e implementar un sistema de control mediante una tarjeta de control de movimiento.
- Diseñar e implementar una interfaz de interacción con el usuario.
- Diseñar un sistema de recirculación de los materiales que utiliza la máquina para evitar el taponamiento de las mangueras.
- Automatizar subprocesos manuales para evitar errores en la puesta en marcha y funcionamiento de la máquina.
- Documentar las interconexiones de los subsistemas eléctrico, hidráulico, neumático y de control de la máquina.

## CAPÍTULO II

### MARCO REFERENCIAL

#### 2.1. Control numérico computarizado

Según (Díaz, 2008), un sistema controlado numéricamente se define como “una máquina o proceso controlado mediante un programa el cual está formado por un conjunto de números y letras que siguen un estándar por la EIA (Electronic Industries Association) o la ISO (International Standards Organization)” (p. 2).

Esta tecnología está formada por varias áreas del conocimiento como la ingeniería de manufactura, el diseño de piezas, generación del código NC (Numeric Control) con su respectiva verificación los cuales deben involucrarse simultáneamente con la finalidad de obtener el mayor provecho de dicha tecnología.

Por otra parte el control numérico computarizado es definido como un dispositivo controlado por órdenes específicas regidas por un lenguaje de programación enviadas por un computador con la finalidad de gobernar la posición de dicho dispositivo. (Bolívar, 2012)

Por lo cual, el control numérico computarizado (CNC) según las similitudes en los criterios de los autores mencionados puede definirse como un dispositivo controlado mediante un programa conformado por órdenes programadas con la finalidad de controlar los movimientos de un terminal(herramienta).

En palabras de (Gómez & Muñoz, 2006)la utilización de control numérico computarizado para actividades de manufactura tiene las siguientes ventajas:

- La máquina de control numérico posee un alto nivel de precisión al ejecutar las instrucciones.
- Incrementa la posibilidad de fabricar piezas complicadas de realizar con máquinas tradicionales.
- Reducción de los tiempos de operación.
- Posee mayor versatilidad, se puede realizar más actividades a comparación con otros tipos de máquinas.

## **2.2. Máquina de tiras de poliuretano**

### **2.2.1. Introducción**

En palabras de (Cardozo, 2011), el tablero de control eléctrico industrial “es una caja o gabinete que contiene dispositivos de conexión, maniobra, comando, protección, señalización y medición, para realizar una tarea específica dentro de un sistema de tipo eléctrico” (p. 16). Por lo que son construidos a partir de normas vigentes con la finalidad de salvaguardar la integridad de las personas y los bienes contra potenciales riesgos de tipo eléctrico.

La Norma de Construcción (NEC) vigente en el Ecuador señala en su capítulo 15 referente a instalaciones electromecánicas que la puerta exterior de los tableros eléctricos “será totalmente cerrada con un grado de hermeticidad de acuerdo a su aplicación” (p.29). Por tanto, es necesario colocar empaques de poliuretano en los bordes internos de las puertas del tablero para conservar su grado de hermeticidad e impedir que agentes externos ingresen y puedan provocar fallos o daños en los dispositivos eléctricos que se encuentran dentro del tablero.(Entidad Colaboradora del Colegio de Arquitectos de Pichincha, 2013).

### **2.2.2. Fabricación de poliuretano**

El poliuretano es la mezcla de dos componentes líquidos: polioli e isocianato; esta mezcla produce una reacción química dando lugar a la espuma de poliuretano. (Universidad Politécnica de Catalunya, s.f.)

Según el documento publicado por la (Universidad Politécnica de Catalunya, s.f.) existen dos procesos de fabricación de poliuretano los cuales son los siguientes:

1. Proceso de proyección el cual radica en pulverizar mediante una máquina la mezcla de dos componentes (poliol e isocianato) sobre la superficie que se desea aislar en la cual dicha mezcla se endurece y expande. Se aplica en varias ocasiones hasta alcanzar el espesor deseado.

2. Proceso de colada radica en mezclar los dos componentes líquidos (poliol e isocianato) y luego colar la mezcla, luego la mezcla se endurece y expande para rellenar la cavidad.

Al referirse a la espuma de poliuretano colocada directamente en el lugar de la instalación como es el caso de la máquina de espuma de poliuretano DG- PU20TJ la cual coloca esta espuma de manera directa en los bordes internos de la puerta de los tableros eléctricos, se puede considerar el proceso de colada ya que se coloca una sola vez según las medidas indicadas por el operador.

### **2.3. Lenguaje de programación**

Las máquinas CNC para su funcionamiento utilizan software específico el cual es conocido como código G. Este lenguaje de programación está regido por la norma ISO 1056.

### 2.3.1. Estructura del lenguaje

Según el documento publicado por (Universidad Nacional de Educación a Distancia) el lenguaje de programación para máquinas CNC además también se encuentra en las normas DIN 66024 y DIN 66025 las cuales poseen contenidos similares a la norma ISO 1056.

En cuanto a las estructuras que existen en este lenguaje se puede mencionar las palabras, los bloques y los programas. Las palabras están conformadas por series de letras y números, los bloques son una cantidad determinada de palabras y los programas están conformados por un número determinado de bloques.(Universidad Nacional de Educación a Distancia).

La estructura de cada bloque de programación del código G posee los siguientes caracteres:

- M: funciones secundarias.
- T: número de herramienta con su respectiva compensación, esta instrucción posee cuatro dígitos los dos primeros para la selección de la herramienta y los restantes para la compensación.
- S: valor de la velocidad del husillo.
- F: velocidad de avance utilizada en el proceso.
- Z: coordenada del eje Z.
- X: coordenada del eje X.
- G: tipo de operación o movimiento, por ejemplo movimiento lineal, circular, rápido, etc.
- N: línea de programación, su valor empieza desde 0 hasta 9999.
- O: número del programa, su valor empieza desde 0 hasta 9999.
- R: plano de referencia en los ciclos por ejemplo el radio en interpelación circular.

- U: coordenada en modo incremental en el eje X relativo a la posición instantánea de la máquina.
- W: coordenada en modo incremental en el eje Z relativo a la posición instantánea de la máquina.

### **2.3.2. Ejecución**

La ejecución de los programas se realiza según el número de cada bloque sin embargo también se puede ejecutar los bloques no solamente de uno en uno sino también de tres en tres, de cinco en cinco, etc. En caso de no estar enumerados se ejecutan según el orden en que se encuentren.

### **2.3.3. Código G**

El código G es el nombre que se otorga a un lenguaje de instrucciones para máquinas dirigidas por control numérico por computadora o también denominado CNC, este código es utilizado para controlar estos dispositivos mediante una serie de parámetros establecidos. (Ventura, 2014)

Además, es el lenguaje más difundido para la fabricación que utiliza como controlador una computadora la cual envía instrucciones a la máquina la cual ejecuta determinadas acciones. Debido a la comercialización y popularidad de las máquinas CNC algunos fabricantes realizaron implementaciones y ampliaciones sin embargo todas las máquinas CNC reconocen el código G básico.

El código G de manera general se almacena en archivos de texto simple por lo cual puede modificarse y visualizarse con un editor de texto plano, sin embargo, actualmente es generado mediante programas de computadora de tipo CAD/CAM los cuales generan el código G adecuado para cada máquina en particular.

## **2.4. Sistemas electrónicos comunes de una máquina CNC**

### **2.4.1. Motores de desplazamiento**

Son aquellos dispositivos que pueden generar fuerza a partir de un tipo de energía o gases, los motores de la máquina CNC reciben la orden de un controlador para mover la herramienta final hacia la posición indicada, a parte de los motores eléctricos se utilizan también hidráulicos y neumáticos cada uno de estos con un fin respectivo. Los actuadores hidráulicos se utilizan en actividades con requerimientos de una considerable cantidad de potencia mientras que los neumáticos son recomendados en actividades de posicionamiento (lineal o circular).

### **2.4.2. Relés**

El relé actúa como un interruptor que se encuentra accionado por un electroimán, básicamente su funcionamiento se centra en la bobina que se encuentra en el núcleo del relé la cual genera un campo magnético que genera la conexión entre los contactos mientras que un electroimán realiza el cierre de dichos contactos de esta manera permite o interrumpe el paso de corriente eléctrica.

### **2.4.3. Contactores**

Son dispositivos que permiten el paso de la corriente eléctrica que puede ser accionado a distancia, posee dos posiciones de funcionamiento estable cuando no recibe ninguna señal de circuito de control y otra inestable cuando está presente dicha señal en el dispositivo.

Además de su contacto principal posee contactos secundarios los cuales pueden ser abiertos o cerrados los cuales se activan cuando la bobina es excitada.

## **2.5. Tipos de control de trayectoria**

Las máquinas CNC son utilizadas en varias actividades que se desarrollan en la industria por lo cual existen tres tipos de control:

### **2.5.1. Control punto a punto**

Controla puntos definidos en la programación, es decir, no posee control sobre el recorrido de la herramienta a través de los puntos señalados ni la velocidad de desplazamiento entre los puntos. Este tipo de control es el más sencillo por ende es el más barato implementado se utiliza en máquinas tipo semipunteadora, taladradora, etc. (Universidad Nacional del Callao, 2011)

### **2.5.2. Control paraxial**

El desplazamiento se realiza únicamente de manera ortogonal o paralelo a los ejes, este control no posee interpolación es decir solo puede controlar un motor a la vez. Unos ejemplos de este tipo de máquinas son aserradoras, fresadoras. (Universidad Nacional del Callao, 2011)

### **2.5.3. Control interpolar o continuo**

Posee la capacidad de realizar cualquier recorrido dentro de un plano, es decir puede realizar líneas curvas y líneas rectas en cualquier tipo de inclinación, para lo cual controla varios ejes a la vez.

Este control debe su nombre a que puede mover dos o más motores a la vez de manera simultánea y controlada a lo cual se denomina interpolación, además este control es el más completo por lo cual es el más utilizado y obviamente su implementación requiere un costo muy superior a los anteriores mencionados.(Universidad Nacional del Callao, 2011)

## 2.6. Tarjeta de control de movimiento

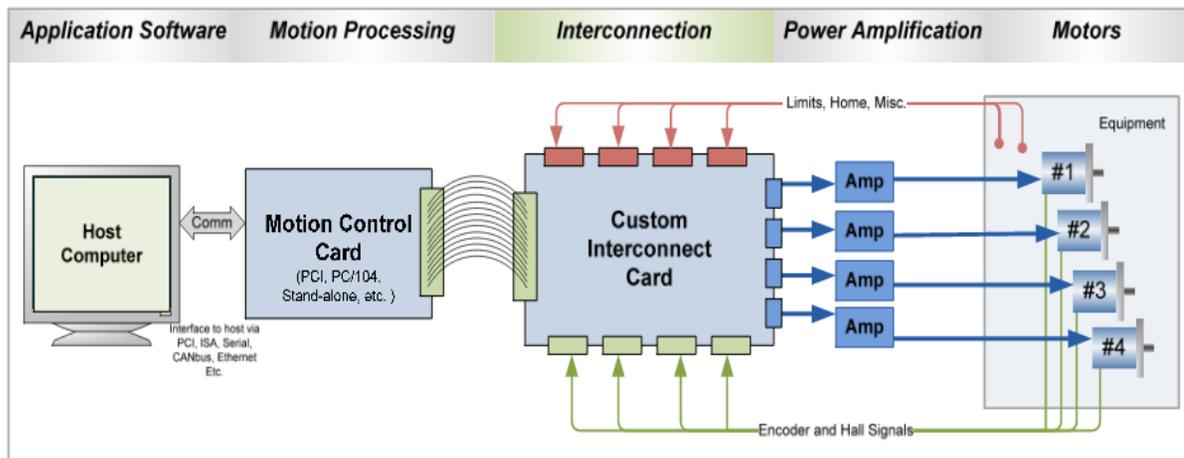
Las tarjetas de control de movimiento son populares para controlar el movimiento en aplicaciones como manufactura ligera, máquinas de laboratorio e instrumentación (Kristjansson, 2009).

Estas tarjetas desde su aparición han sido conectadas a un PC, las primeras tarjetas estaban basadas en el bus ISA posteriormente utilizaron el bus EISA y PCI. La tarjeta más común permite controlar hasta 4 ejes sin embargo existen algunas que admiten hasta 32 ejes.(Kristjansson, 2009).

Los componentes de un sistema de control de movimiento son los siguientes:

- Tarjeta de control de movimiento
- Placa base de PC
- Tarjeta de interconexión.
- Chasis es obligatorio en el caso de estándar PCI.
- Tarjeta de entradas y salidas, las entradas y salidas en algunos casos pueden estar incluidas en la tarjeta de control de movimiento.

Gracias al avance en la fabricación de chips con procesadores más potentes y con mejor relación calidad – precio las tarjetas de control de movimiento han agregado mejoras importantes como la integración de una memoria no volátil para almacenar programas y que puedan ejecutarse con la ayuda de un activador como por ejemplo un PC, un temporizador, una entrada, etc. (Kristjansson, 2009).



**Figura 1.** Sistema de tarjeta de control de movimiento conectada a PC  
**Fuente:** (Kristjansson, 2009)

También existe comunicación entre el host PC y la tarjeta de control de movimiento mediante la interfaz Ethernet con una velocidad de datos de 100 Mbps lo cual permite que la tarjeta no esté junto al host sino que puede estar más cerca de los actuadores como motores de esta manera se simplifica el cableado del sistema y se puede obtener una estructura por módulos.

Existe una gran variedad de tarjetas de control de movimiento sin embargo se pueden considerar algunas funciones estándar en las tarjetas actuales según (Kristjansson, 2009) las cuales son las siguientes:

- Señales de control de motor de 1 a 4 ejes
  - Voltaje DC de -10 V a +10 V.
  - Señales de pulso y dirección
  - PWM

- Selección del perfil de movimiento
  - Trapezoidal y/o contador de velocidad.
- Algoritmos de control
  - PID de control de posición
  - PID de control de velocidad
- Señal de retroalimentación del encoder
- Entradas y salidas específicas
  - Switch final de carrera
  - Paro de emergencia
  - Enable
- Entradas y salidas de propósito general
  - Mínimo 4 entradas y salidas digitales
  - Entradas analógicas de -10 VDC a +10 VDC
- Bus de comunicaciones
  - PCI

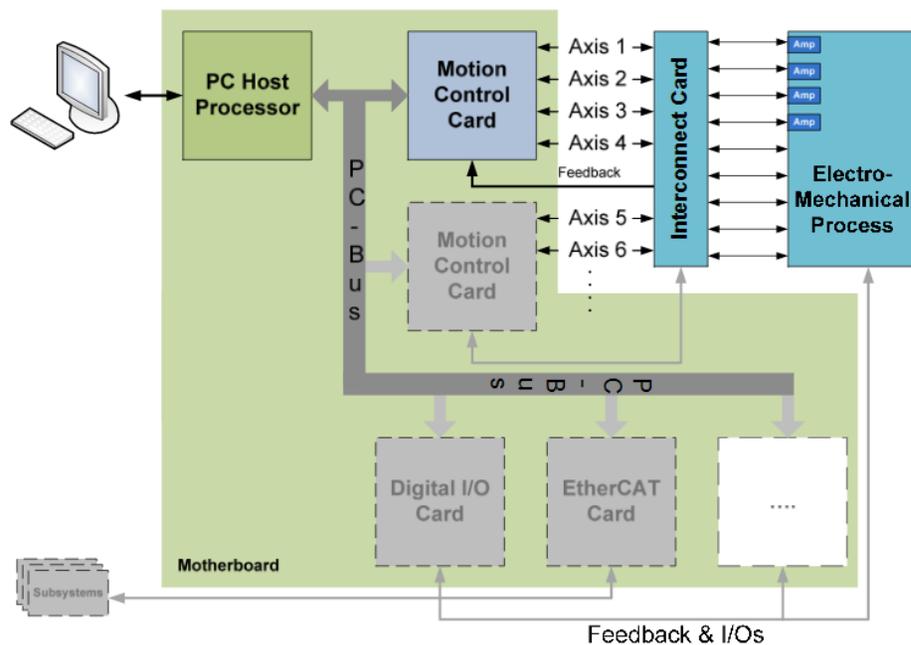
En cuanto a la programación de las tarjetas de control de movimiento pueden guardar código gracias a la memoria no volátil de esta manera se crea sistemas embebidos. Algunos fabricantes crean su propio lenguaje para sus propias tarjetas con esto eliminan la necesidad de un compilador. Además, que limitan las actividades que el usuario puede realizar así se minimizan los riesgos cuando el usuario tiene que programar complemente.

Desde la visión del usuario al utilizar sistemas desarrolladas por el fabricante de la tarjeta no se puede reutilizar el programa en una tarjeta de otra marca, además al tener funciones previas el

usuario no puede crear funciones nuevas según la necesidad del mismo. Uno de los lenguajes de programación más utilizados es C/C++ por lo que otras empresas permiten que los usuarios desarrollen sus programas en este lenguaje para aprovechar la capacidad de la tarjeta al máximo y las funciones que el usuario necesite para su aplicación. (Kristjansson, 2009).

El bus PCI es el más utilizado para la conexión de tarjetas de control de movimiento con la placa base de la PC, en algunos casos se adicionan tarjetas de entradas y salidas o tarjetas de comunicación hacia otros dispositivos por medio de Ethernet, Modbus RS 485 o incluso EtherCAT, el cual es un protocolo de comunicación industrial basado en la comunicación establecida por Ethernet.

En la figura 2 se muestra la conexión utilizando una tarjeta PCI para ejecutar un control de movimiento.



**Figura 2.** Sistema de control de movimiento – tarjeta PCI  
**Fuente:** (Kristjansson, 2009)

## **2.7. Mach 3**

Mach 3 es un paquete de software distribuido por ArtSoftCorp que permite utilizar una computadora sea portátil o de escritorio como un controlador de máquinas CNC. Es ejecutable en los sistemas operativos con arquitectura de 32 bits Windows XP, Windows 2000 y Windows 7, se comunica mediante dos puertos paralelos (DB-25) y un puerto serial (COM) con los drivers que posee una máquina CNC.

Las señales que Mach 3 envía por los puertos de comunicación de la computadora hacia los drivers de los motores (servomotores o motores de paso) que posee la máquina CNC son de pulso y dirección a su vez estos drivers envían hacia Mach 3 la señal de los codificadores digitales (encoders) que indican la posición y velocidad actual de los motores que manejan.

Mach 3 permite utilizar pequeños programas que el usuario puede crear para realizar operaciones de rutina que necesite el proceso sin la necesidad de utilizar o tener un archivo de código G.

### **2.7.1. LazyCam**

LazyCam es un programa adjunto al paquete de software de Mach 3, este software para manufactura permite generar código G para máquinas CNC utilizando el diagrama realizado en software CAM como por ejemplo Autocad. Es decir proporciona las coordenadas y la trayectoria que debe seguir la herramienta de la máquina CNC.

Este software soporta archivos de formato .dxf, .wmf, .hplg, .plt, entre otros. Además reconoce y permite editar cada capa (layer) del archivo ejecutado permitiendo así una mayor optimización al proceso de maquinado según las necesidades de cada usuario.

### 2.7.2. Screen 4

Screen 4 es un software distribuido por ArtSoftCorp incluido en el paquete de Mach 3. Este software permite crear y modificar pantallas para la interfaz HMI utilizadas por una máquina CNC controlada por Mach 3. Dichas interfaces se crean o editan de acuerdo a la necesidad del proyecto o personalizarlas según cada usuario.

Los principales elementos que posee Screen 4 son:

- Dro: Genera la visualización de cantidades numéricas como posición, velocidad, aceleración, etc.
- Button: Permite realizar acciones.
- Image: Inserta una imagen seleccionada en la pantalla.
- Label: Permite introducir texto en la pantalla HMI.
- LED: Indicador del estado de una variable en particular previamente programada.
- GCodeList: Muestra el código G que se desea ejecutar.
- ToolPath: Indica la posición y el movimiento en tiempo real que posee la herramienta sobre la trayectoria.

### 2.8. Modbus

Modbus es un protocolo que es utilizado en la industria para comunicar varios dispositivos utilizados en la automatización. Fue desarrollado en el año 1979 como una comunicación de tipo serial, con el avance del desarrollo en años posteriores se ha incluido la posibilidad de hacer uso de otros protocolos como TCP/IP y UDP (User Datagram Protocol). (National Instruments, 2019)

Este protocolo se utiliza en sistemas maestro – esclavo, el proceso de comunicación consiste en que cada uno de los dispositivos inicia una solicitud de envío de mensaje luego debe esperar

una respuesta mientras que el maestro es quien inicia la comunicación entre los dispositivos que envíen la solicitud de envío del mensaje. (National Instruments, 2019)

Este protocolo de comunicaciones siempre está presente en dispositivos electrónicos industriales, su uso es muy común en varios campos de la industria porque es público, su implementación es sencilla y maneja bloques de datos casi sin ningún tipo de restricción.

### 2.8.1. Trama del protocolo Modbus

La forma de la trama genérica del protocolo Modbus está conformada por 4 campos: ID, función, dato y CRC.

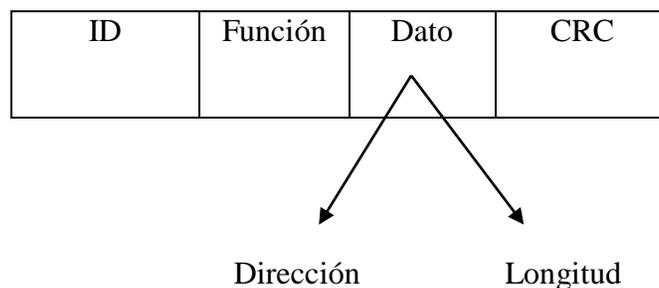
ID 1 byte	Función 1 byte	Dato nx byte	CRC 2 bytes
--------------	-------------------	-----------------	----------------

**Figura 3.** Trama de protocolo Modbus

- ID: Es la dirección del esclavo, es decir el número con el cual se identifica a cada dispositivo, están identificados con números enteros desde el 1 al 255.
- Función: Es el tipo de solicitud que se envía a un dispositivo esclavo, las funciones se identifican con números enteros.
- Dato: Es el mensaje que envía el dispositivo el cual posee una estructura diferente cuando es enviado por un maestro o un esclavo.
- CRC: Es el método de codificación utilizado por el protocolo Modbus el cual esta codificado en dos bytes.

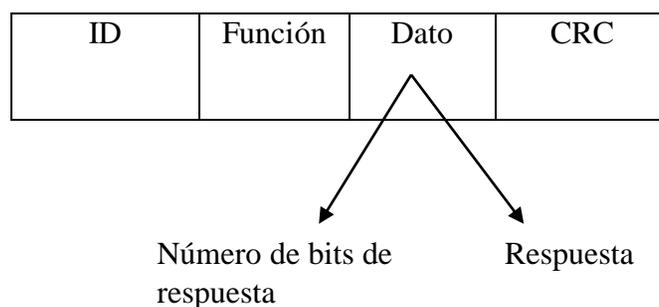
La estructura de la trama del maestro es particular en el campo dato conformado por dirección y longitud. La dirección indica al dispositivo esclavo en qué lugar debe buscar el mensaje que ha

solicitado en el campo función y la longitud indica cuantos elementos debe tomar de la dirección.(Hurtado, n.d.).



**Figura 4.** Trama de dispositivo maestro de Modbus

La estructura de la trama del esclavo también se diferencia en el campo dato está conformado por número de bits del respuesta y respuesta.(Hurtado, n.d.).



**Figura 5.** Trama de dispositivo esclavo de Modbus

### 2.8.2. Funciones del protocolo Modbus

Las funciones de Modbus están identificadas por medio de números enteros desde el 1 al 127, se puede distinguir tres grandes grupos de funciones: públicas, excepciones y definidas por el usuario.(Modbus Organization, 2017).

Las funciones públicas de Modbus están disponibles en todos los dispositivos que posean comunicación Modbus sin importar su marca. Las funciones públicas más comunes son:

- Read coils (01): Es utilizada comúnmente en PLC para leer las salidas tipo relé, cuando esta función es enviada por el dispositivo maestro a un dispositivo esclavo está solicitando el estado de las salidas, es decir, prendido o apagado.
- Read discrete inputs (02): Permite leer las entradas que posea el dispositivo esclavo.
- Read holding register (03): El dispositivo maestro solicita al esclavo la información de una posición de memoria específica, donde la memoria debe ser de tipo lectura y escritura, además es una función fundamental para obtener información de cualquier tipo del dispositivo esclavo.
- Read input register (04): Permite obtener al dispositivo maestro la información de una posición de memoria tipo lectura.

Las funciones que indican excepciones son utilizadas por los dispositivos esclavos para indicar condiciones de error, además pueden indicar una respuesta ante solicitudes específicas. Las cuatro excepciones más comunes son las siguientes:

- 01: El código de la función recibida no es correcto.
- 02: Acceso a una dirección no válida, esto puede indicar se excede en la dirección de inicio y el valor del dato solicitado.
- 03: Solicitud con datos incorrectos, esto indica que entre el dispositivo maestro y esclavo existe un error en los parámetros por ejemplo cantidad de bytes y número de registros.

- 04: Error irrecuperable al procesar la solicitud, esto indica que la solicitud era válida pero el dispositivo esclavo no pudo ejecutarla.

Las funciones definidas por el usuario están identificadas por los códigos del 65 al 72 y 100 al 110, en estos códigos el usuario puede usar la estructura de datos que desee además de exceder el límite, pero la aplicación completa debe ser validada para asegurar que el protocolo funcione correctamente.(National Instruments, 2019).

				Function Codes		(hex)	Section
				code	Sub code		
<b>Data Access</b>	<b>Bit access</b>	Physical Discrete Inputs	Read Discrete Inputs	<b>02</b>		<b>02</b>	6.2
		Internal Bits Or Physical coils	Read Coils	<b>01</b>		<b>01</b>	6.1
			Write Single Coil	<b>05</b>		<b>05</b>	6.5
			Write Multiple Coils	<b>15</b>		<b>0F</b>	6.11
	<b>16 bits access</b>	Physical Input Registers	Read Input Register	<b>04</b>		<b>04</b>	6.4
			Read Holding Registers	<b>03</b>		<b>03</b>	6.3
		Internal Registers Or Physical Output Registers	Write Single Register	<b>06</b>		<b>06</b>	6.6
			Write Multiple Registers	<b>16</b>		<b>10</b>	6.12
			Read/Write Multiple Registers	<b>23</b>		<b>17</b>	6.17
			Mask Write Register	<b>22</b>		<b>16</b>	6.16
			Read FIFO queue	<b>24</b>		<b>18</b>	6.18
	<b>File record access</b>		Read File record	<b>20</b>		<b>14</b>	6.14
			Write File record	<b>21</b>		<b>15</b>	6.15
	<b>Diagnostics</b>		Read Exception status	<b>07</b>		<b>07</b>	6.7
			Diagnostic	<b>08</b>	<b>00-18,20</b>	<b>08</b>	6.8
		Get Com event counter	<b>11</b>		<b>0B</b>	6.9	
		Get Com Event Log	<b>12</b>		<b>0C</b>	6.10	
		Report Server ID	<b>17</b>		<b>11</b>	6.13	
		Read device Identification	<b>43</b>	<b>14</b>	<b>2B</b>	6.21	
<b>Other</b>		Encapsulated Interface Transport	<b>43</b>	<b>13,14</b>	<b>2B</b>	6.19	
		CANopen General Reference	<b>43</b>	<b>13</b>	<b>2B</b>	6.20	

**Figura 6.** Código de funciones de Modbus  
**Fuente:** (Modbus Organization, 2017)

### 2.8.3. Modbus RTU

Modbus RTU (Unidad Terminal Remota) permite una comunicación serial utilizando los protocolos RS485, RS232 y RS422, comúnmente se lo utiliza para comunicar un PLC con un HMI que se encuentra en una computadora. Las principales características de Modbus RTU son que verifica los errores mediante la función CRC y usa codificación binaria. Además, es el tipo de Modbus más utilizado en aplicaciones industriales y áreas de automatización. Esta comunicación tipo serial requiere que se fije tres parámetros: el formato de caracteres de la comunicación, la identificación del esclavo al momento de empezar la comunicación y la velocidad en baudios.(Weis, Guia de comunicación Modbus RTU, 2019).

Cuando el protocolo Modbus se implementa utilizando la capa física el estándar RS485 destacan las siguientes características:

- Distancia máxima: 1.2 Km.
- Rango de voltajes: -6 VDC a +6 VDC.
- Cantidad máxima de equipos interconectados: 32
- Comunicación mono maestro: El dispositivo maestro solo puede comunicarse con un dispositivo esclavo a la vez.

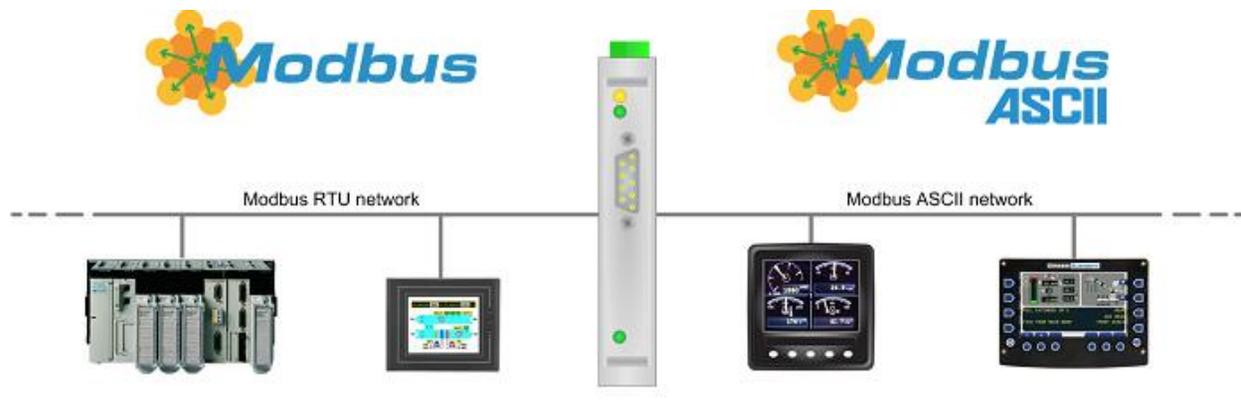
### 2.8.4. Modbus ASCII

El protocolo Modbus ASCII desciende directamente del protocolo Modbus original al igual que Modbus RTU, como su nombre lo indica para la comunicación utiliza caracteres ASCII lo cual hace que sea más sencillo entender al usuario además utiliza el método de comprobación de errores LRC (Weis, Tutorial Avanzado Modbus ASCII, 2019).

El formato de los datos de Modbus ASCII es el siguiente:

- 1 bit de inicio
- 7 bits de datos donde el primer bit es el menos significativo
- 1 bit para completar la paridad
- 1 bit de parada

A pesar que los protocolos Modbus RTU y Modbus ASCII son parte de la especificación de Modbus original no son compatibles entre ellos, sin embargo, mediante un dispositivo llamado Modbus ASCII to RTU converter pueden comunicarse. (Weis, Tutorial Avanzado Modbus ASCII, 2019).



**Figura 7.** Convertidor Modbus ASCII en Modbus RTU

**Fuente:** (Modbus Organization, 2017)

### 2.8.5 Modbus TCP/IP

El protocolo Modbus TCP/IP permite realizar una comunicación Modbus mediante una conexión Ethernet la conexión más común es entre un PLC y sus módulos de entrada y salida

remotos. Uno de los cambios más notorios es el nombrar a los dispositivos maestros como clientes y a los esclavos como servidores.

La capa física en Modbus TCP/IP es el conector RJ45 de la misma manera obedece al modelo OSI implementado las redes que utilizan este tipo de conexión. La principal diferencia entre Modbus TCP/IP y Modbus RTU es que la trama de datos TCP que contiene la PDU empieza con un identificador MBAP (Protocolo de Aplicación Modbus) de 2 bytes en lugar de la identificación del esclavo, además no existe la verificación CRC porque la capa TCP lo realiza(Weis, Guia de comunicación Modbus RTU, 2019).

## CAPÍTULO III

### INGENIERÍA BÁSICA

#### 3.1. Máquina CNC Donggao DG-PU20TJ

Para realizar la repotenciación de la máquina de empaques de poliuretano es indispensable conocer a fondo su funcionamiento, por lo que al inicio se ha realizado el levantamiento de información de todos los componentes de la máquina para entender sus funciones y su estructura.



*Figura 8.* Máquina CNC Donggao DG-PU20TJ en condición original

Para explicar el funcionamiento de la máquina se ha dividido en los siguientes subsistemas:

- Subsistema motor de la herramienta
- Subsistema neumático
- Subsistema hidráulico
- Subsistema de control

### **3.1.1. Subsistema motor de la herramienta**

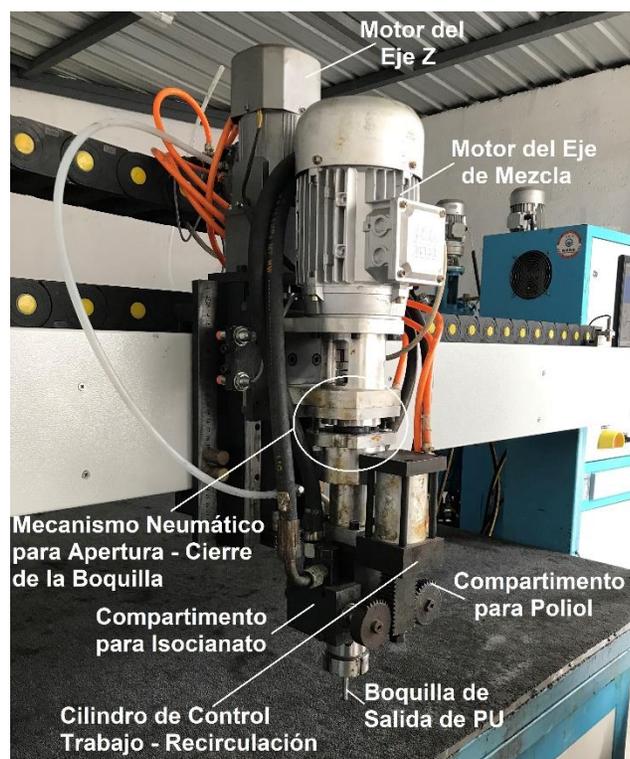
La herramienta de la máquina consiste en un cabezal de mezcla controlado por dos motores: el primero realiza la función de subir y bajar el cabezal hasta la posición de trabajo (Eje Z), y el segundo se encarga de activar un eje interno que gira para realizar la mezcla de los químicos y la dispersión de la mezcla en la puerta.

La herramienta cuenta con dos compartimentos laterales, los cuales se encargan de recibir los químicos Poliol e Isocianato y dejarlos pasar hacia el cabezal para su mezcla (Trabajo) o de regreso hacia los tanques de almacenamiento (Recirculación). El trabajo o recirculación de los químicos es controlado por un cilindro de paso ubicado en la parte frontal que hace girar el eje interno de cada mecanismo.

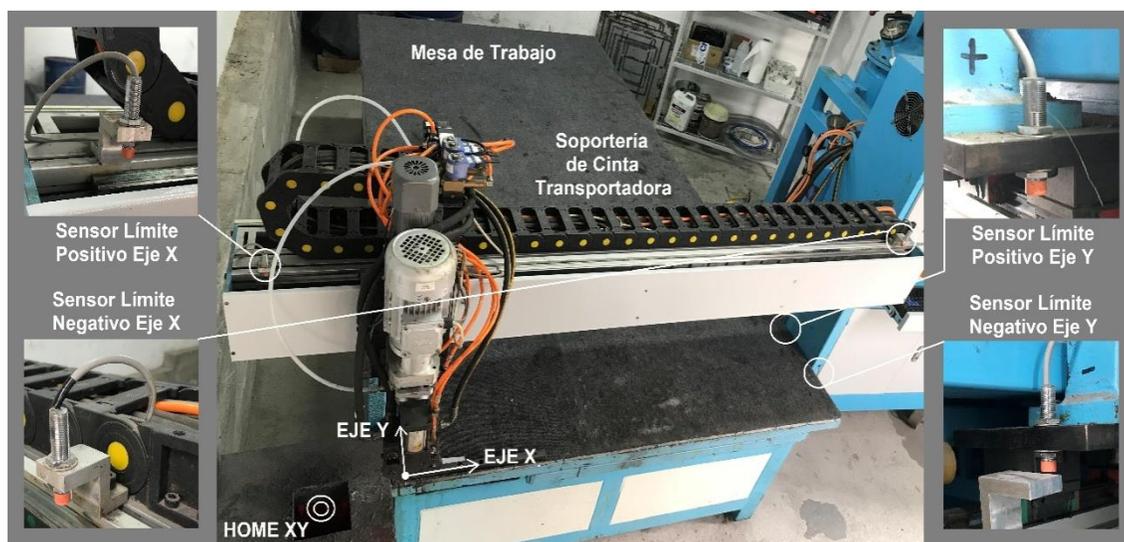
Finalmente, la herramienta cuenta con un sistema neumático que permite abrir o cerrar la salida de la mezcla en la parte inferior del cabezal con el objetivo de evitar derrames innecesarios en la mesa de trabajo una vez se haya finalizado el empaque.

Para el movimiento de la herramienta (cabezal de mezcla) sobre la mesa de trabajo se tiene dos servomotores ubicados en los ejes X e Y, los cuales son controlados por sus respectivos servodrives de la marca Leadshine.

Los tres ejes cuentan con sensores inductivos de seguridad para limitar el movimiento de la herramienta en una zona segura de la mesa de trabajo. Los sensores del eje Z están ubicados en un lateral de la herramienta, mientras que los de los ejes X e Y están ubicados en la mesa de trabajo.



**Figura 9.** Herramienta: Cabezal de mezcla de poliuretano



**Figura 10.** Ubicación de los sensores límite de los ejes X e Y

### 3.1.2. Subsistema neumático

Este subsistema se encarga de suministrar aire regulado a una presión de 70 PSI (dimensionado por el fabricante) y tiene los siguientes componentes:

**Compresor de Aire:** Se encarga de generar aire a alta presión para suministro de las máquinas de Sical Ingeniería.



*Figura 11.* Compresor de aire

**Unidad de Mantenimiento:** Esta unidad de la marca Shako se conforma por un filtro, regulador y lubricador para el aire que llega del compresor. El aire se regula a 70 PSI (figura 12).

**Tanque de Químico de Limpieza:** Es utilizado para almacenar el químico de limpieza (Dicloruro) del cabezal. El tanque es llenado con aire hasta llegar a una presión de 43 PSI por medio de un regulador de presión ubicado a la entrada de la línea de aire, por otro lado, se tiene un conducto de salida para el envío del químico hacia el cabezal. También cuenta con un embudo para el ingreso del suministro del Dicloruro y una válvula manual de desfogue en la parte inferior (figura 13).



*Figura 12.* Unidad de mantenimiento a 70 PSI.



*Figura 13.* Tanque de cloruro de metileno

**Electroválvulas de Control:** Estas electroválvulas permiten el paso de aire y/o dicloruro para realizar diversas funciones en el cabezal de la máquina. Las electroválvulas se describen a continuación:

- EV1: Permite el paso del aire para el procedimiento de limpieza del cabezal.
- EV2: Permite el paso del dicloruro para el procedimiento de limpieza del cabezal.
- EV3: Libera el aire comprimido en las mangueras cuando se realiza el procedimiento de limpieza del cabezal.
- EV4: Activa el cilindro de paso del cabezal para poner los químicos en modo trabajo o en modo recirculación.
- EV5: Activa el sistema de apertura y cierre de la salida del cabezal.



*Figura 14.* Electroválvulas neumáticas

### 3.1.3. Subsistema hidráulico

Este subsistema se encarga de la distribución de los químicos polioli e isocianato para su mezcla en el cabezal de la máquina en modo de Trabajo. El subsistema hidráulico tiene los siguientes componentes:

**Tanques de Almacenamiento de Químicos:** Estos tanques están ubicados en la parte posterior del tablero de control y son utilizados para almacenar el polioli e isocianato de forma separada, cuentan con motores agitadores en la parte superior para mantener la consistencia de los químicos, un conducto de entrada para ingreso del químico, un visor para verificar el estado del químico y en la parte inferior tiene un juego de válvulas manuales que controlan la entrada/salida del químico hacia el cabezal de mezcla.

Además, internamente tienen una cubierta hueca destinada al llenado de agua caliente para control de temperatura de los químicos. Ambos tanques poseen en su parte inferior un sensor de temperatura Jinhui conectado a su respectivo controlador en la puerta del tablero.



*Figura 15.* Tanques de almacenamiento de polioli, isocianato y dicloruro

**Bombas para Circulación de Químicos:** Estas bombas son las encargadas de enviar el químico hacia el cabezal de mezcla, están controladas por dos Drives Sanch de 0.75 Kw los cuales regulan la velocidad según la relación de mezcla que se desee obtener para el Poliuretano. Esta relación es de 0.5 a 0.6 para los empaques de puertas de tableros eléctricos (sugerido por el fabricante) considerando siempre mayor la cantidad de Polioliol que Isocianato en la mezcla.

A la salida de cada bomba se tiene un sensor de presión para detectar obstrucciones en la circulación de los químicos y evitar daños en las bombas.



*Figura 16.* Bombas de polioliol e isocianato

**Bomba de Agua y Resistencia Calefactora:** Estos elementos conforman un sistema de calentamiento para los tanques de almacenamiento de los químicos. El agua ingresa hacia un reservorio principal que se conecta con cada tanque, permitiendo el paso del agua hacia ambos tanques. Mientras la resistencia calienta el agua, la bomba la hace recircular por ambas bombas y de regreso al reservorio, es decir es un sistema cerrado. La activación del sistema de calentamiento se puede controlar con los sensores de temperatura ubicados en cada tanque.



*Figura 17.* Bomba de agua y resistencia calefactora

### 3.1.4. Subsistema de control

Este subsistema se encarga de recibir el diseño del empaque y generar los pulsos de comando necesarios para los servodrive que controlan el movimiento de la herramienta. El sistema de control es del tipo CNC y tiene los siguientes componentes:

**PC de Control:** Computador con sistema operativo Windows XP funcionaba en idioma chino, y contiene los programas del fabricante para la puesta en marcha de los subsistemas antes descritos y el control de movimiento de la herramienta, todo en idioma chino. En el computador se llevan a cabo las siguientes tareas pero con la dificultad ya mencionada del idioma chino:

- Diseño del empaque utilizando software CAD.
- Generación de código G según el diseño utilizando el programa “Loader”.
- Generación de los pulsos necesarios para el control de movimiento de los servodrive.

Este sistema de control ha sido reemplazado por completo por un sistema más amigable en idioma español, que se detalla en un capítulo posterior.



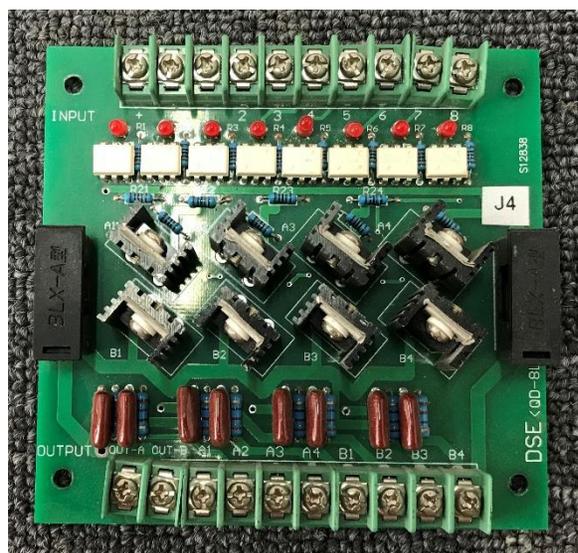
*Figura 18.* PC de control

**Tarjeta de Control de Movimiento PCI:** Esta tarjeta está diseñada para recibir las señales generadas por el computador y transmitir las por un puerto paralelo incorporado hacia el tablero de control. Esta tarjeta se encuentra dañada y no se pudo conseguir un reemplazo por el fabricante por lo que se optó por realizar un nuevo sistema de control.



*Figura 19.* Tarjeta de control de movimiento Donggao

**Tarjetas Electrónicas Auxiliares:** La máquina CNC de Empaques utiliza dos tipos de tarjetas auxiliares, las primeras separan las señales del puerto paralelo para su uso en bornes y las segundas son tarjetas optoacopladas para separar las señales del puerto paralelo que trabajan a niveles de 5Vdc y controlar los relés de mando de cada componente que trabajan a 220VAC.



*Figura 20.* Tarjeta optoacoplada 5VDC – 220VAC



*Figura 21.* Tarjeta auxiliar para puerto paralelo de 40 pines

Estas tarjetas en el sistema de control actual han sido reemplazadas por una tarjeta de control de movimiento genérica

### **3.1.5. Principio de funcionamiento**

La máquina CNC de empaques de poliuretano inicialmente estaba sin funcionamiento. Para realizar la repotenciación fue necesario conocer la filosofía de funcionamiento y operación. Esta filosofía de operación fue obtenida de las conversaciones con los operarios de la empresa quienes nos permitieron establecer el procedimiento de operación de la máquina que se describe a continuación.

**Diseño del Empaque:** Se comienza dibujando el contorno del empaque en un programa CAD, en este caso Autocad, definiendo las medidas tanto del eje X como del eje Y.

**Generación de Código G:** Luego se transforma el archivo de dibujo en su equivalente en Código G, el archivo resultante se almacena en texto plano y contiene las instrucciones para realizar el trazado de la figura requerida para el empaque. El usuario realiza este proceso mediante el programa “Loader” incluido en la CPU de la máquina.

**Movimiento y Seguimiento de Trayectoria:** El archivo con Código G es cargado en otro programa llamado “CRS-PU” el cual interpreta las instrucciones de código G y genera los pulsos de movimiento que van hacia los servodrives por medio del puerto paralelo del PC.

**Mezcla de Químicos para Poliuretano:** Mientras la herramienta avanza, el cilindro de paso se activa dejando pasar los químicos (Poliol e Isocianato) hacia el cabezal para su mezcla y aplicación. Al acabarse la figura requerida, el cilindro de paso se desactiva dejando el sistema en recirculación.

**Limpieza del Cabezal:** Finalmente, el usuario puede habilitar la limpieza del cabezal para terminar el trabajo, en este paso el juego de electroválvulas actúa para dejar pasar el químico de limpieza (Dicloruro) hacia el cabezal y limpiarlo para una nueva aplicación de empaque.

El procedimiento real del sistema de limpieza del cabezal es mucho más complejo que la información proporcionada por los operarios y fue producto de la investigación en este trabajo

### **3.2. Requerimientos del nuevo sistema de control**

El nuevo sistema de control a implementar debe sustituir todas las funciones actuales del software propietario del fabricante y reemplazar a la tarjeta de control de movimiento por una de similares características, pero más accesible en el mercado con el fin de tener acceso inmediato a repuestos locales para su reemplazo. Las funciones del nuevo sistema de control se describen a continuación:

#### **3.2.1. Diseño del empaque en software CAD**

El diseño del empaque se debe seguir realizando en Autocad por facilidad del usuario y debido a que el personal de Sical Ingeniería está muy familiarizado con el entorno de este software. En este apartado el usuario realizará el diseño con todas las medidas necesarias en milímetros.

#### **3.2.2. Control de movimiento de la herramienta**

El sistema de control debe ser capaz de generar las señales de pulsos necesarias para el control directo de los servodrives que controlan el movimiento. Esto se puede lograr con la integración de una nueva tarjeta de control de movimiento, así como de una tarjeta adicional con puerto paralelo para la transmisión de las señales desde el computador.

#### **3.2.3. HMI para control local**

Se dispone de una interfaz HMI para el monitoreo y control de la máquina CNC, la interfaz debe disponer de un diseño que muestre el encendido y apagado de los componentes más

importantes de la máquina, así como el trayecto en tiempo real de la herramienta durante la elaboración del empaque. Finalmente debe permitir cargar los archivos en código G de cada diseño de empaque y de debe visualizar la posición de la herramienta en tiempo real.

#### **3.2.4. Programar rutina de limpieza automática**

La máquina CNC de empaques de poliuretano está diseñada para uso continuo por el fabricante, esto significa que los químicos poliol el isocianato están en continuo movimiento lo cual evita que el isocianato se cristalice y obstruya las mangueras por las cuales circula, así como el compartimento que permite el paso hacia el cabezal de mezcla. En la empresa Sical Ingeniería la máquina es utilizada eventualmente cuando se fabrica tableros eléctricos principalmente por lo cual múltiples veces ha ocurrido taponamiento de las mangueras y por lo tanto reemplazo de estas. Por esta razón se necesita implementar una rutina diaria que active los agitadores de cada tanque y las bombas para la recirculación del material a través de las mangueras, además se propone poner en marcha el sistema de calefacción de los tanques, el cual actualmente está fuera de funcionamiento, esto con la finalidad de recircular los químicos calientes a través de las mangueras y evitar la cristalización del isocianato. Esta rutina se plantea realizar en la madrugada, donde la temperatura ambiente alcanza sus niveles más bajos y el químico puede cristalizarse como sugiere el fabricante.

#### **3.2.5. Permitir diversas formas de empaque**

El anterior sistema de control de la máquina CNC tiene la restricción de elaborar solamente diseños de empaques con contornos cerrados, lo cual es suficiente para la mayoría de los casos, sin embargo, la empresa Sical Ingeniería se ha visto en la necesidad de elaborar empaques con contornos abiertos en varias ocasiones para puertas de tableros peculiares por lo cual el nuevo

sistema de control debe permitir el ingreso de diseños con figuras cerradas para su elaboración sin restricciones.

### **3.2.6. Evitar taponamiento de mangueras**

El problema actual es que al ser utilizada eventualmente cuando hay fabricación de tableros, la máquina se mantiene sin trabajar durante días o incluso semanas por lo que el isocianato que se encuentra en las mangueras y el compartimento lateral derecho del cabezal de mezcla se cristaliza y produce obstrucción de las mangueras. Esto resulta en el cambio completo de las mangueras y la limpieza del compartimento lateral que controla el flujo del isocianato, este proceso puede durar horas dependiendo de la cantidad de químico cristalizado dentro de la pieza por lo que se tiene que incurrir en gastos adicionales, pérdida de tiempo del personal y retrasos en la elaboración de los empaques y por lo tanto en el acabado de los tableros eléctricos.

Por este motivo es necesario solucionar el problema de la cristalización del isocianato. El químico isocianato necesario para la mezcla y generación del poliuretano tiene la propiedad de cristalizarse a temperatura ambiente en contacto con el aire por lo cual es importante mantenerlo cerrado herméticamente y en movimiento rutinario con el agitador de su tanque contenedor como lo recomienda el fabricante.

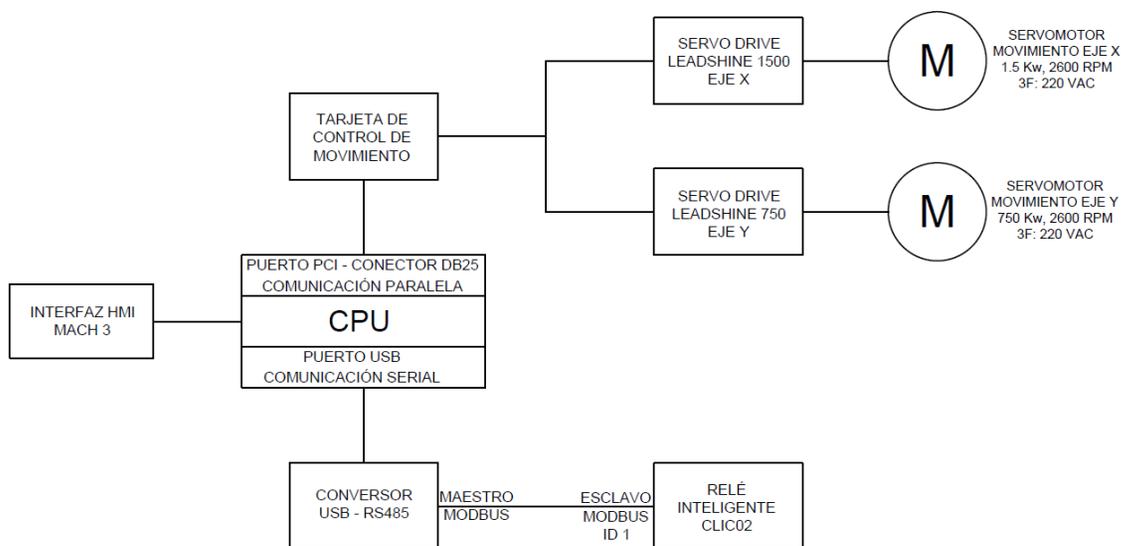
Se plantea realizar una rutina de recirculación de los químicos diariamente, además de habilitar el sistema de calentamiento de los químicos para hacer circular los químicos calientes a través de las mangueras y evitar su taponamiento. La rutina se realizará diariamente para simular el uso constante para el cual la máquina está diseñada.

## CAPÍTULO IV

### INGENIERÍA DE DETALLE

#### 4.1. Arquitectura del sistema de control

La arquitectura del nuevo sistema de control implementado en la máquina CNC de empaques de poliuretano se muestra en la figura 22.



**Figura 22.** Arquitectura del nuevo sistema de control

El sistema de control comienza por la interacción del operador con la interfaz de usuario en la pantalla del computador, el operador debe realizar su diseño del empaque en el software CAD, luego convertir el diseño de vectores en su equivalente código G usando Lazycam para ingresarlo en la interfaz de Mach3. El operario tiene la posibilidad de realizar la simulación de la trayectoria que será visualizada mediante el movimiento del cabezal pero sin producir la impresión del material poliuretano.

El software Mach3 se encarga de generar las señales de pulsos de posición y dirección hacia los servodrivres a través de la tarjeta paralela PCI y la tarjeta de control de movimiento. Además, el sistema integra comunicación Modbus a través de un convertidor RS-485 a USB. La comunicación Modbus con el relé inteligente se integra con la finalidad de activar/desactivar el resto de los elementos de la máquina como agitadores, bombas y el cabezal de mezcla para la fabricación del poliuretano.

Todos los componentes del nuevo sistema de control, tanto de hardware como de software, se detallan a continuación en la sección 4.2.

## 4.2. Hardware y software utilizados

### 4.2.1. Tarjeta de control de movimiento

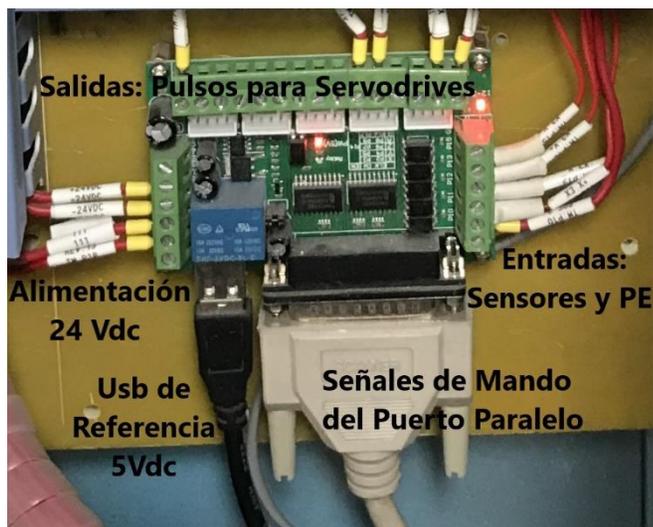
La tarjeta de control de movimiento se utiliza como interfaz de separación entre las señales de control del puerto paralelo y las señales conectadas hacia sensores y servodrivres. Todos los pines de conexión de la tarjeta están optoacopladas para así evitar posibles daños a la tarjeta madre de la PC.

#### **Tabla 1**

*Características tarjeta de control de movimiento Savebase*

#### **Tarjeta de control de movimiento para 5 ejes**

<b>Fabricante</b>	Savebase
<b>Alimentación</b>	12 a 24 VDC
<b>Numero de ejes de control</b>	5 ejes servocontrolados
<b>Frecuencia de conmutación</b>	200 MHz



*Figura 23.* Tarjeta de control de movimiento Savebase

#### 4.2.2. Tarjeta de comunicación paralela PCI

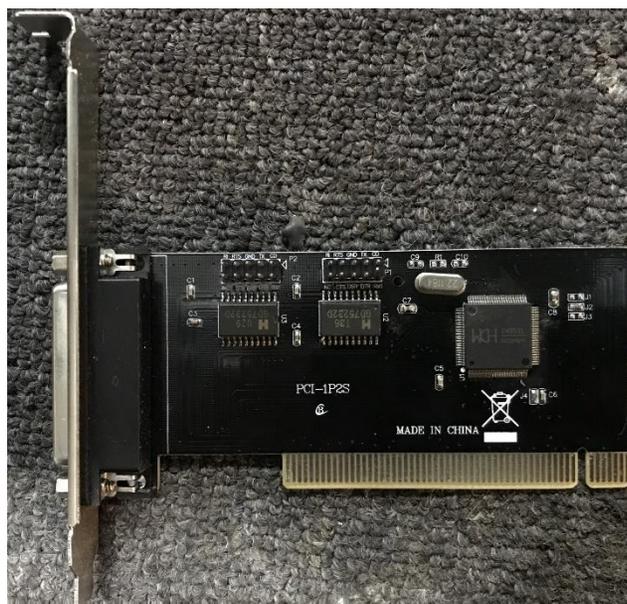
Esta tarjeta electrónica permite obtener un espacio de direcciones destinadas a la comunicación con un puerto paralelo a través del puerto PCI de la tarjeta madre de la PC.

**Tabla 2**

*Tarjeta de comunicación paralela PCI*

**Tarjeta de comunicación paralela PCI**

<b>Fabricante</b>	Genérico
<b>Puerto de conexión</b>	PCI
<b>Tipo de conector</b>	DB 25
<b>Tensión de trabajo</b>	3.3 VDC



*Figura 24.* Tarjeta PCI para puerto paralelo

#### 4.2.3. Relé inteligente Clic 02

Este relé inteligente permite establecer las diferentes rutinas que controlan el comportamiento de la máquina durante la fabricación del empaque, así como las rutinas que controlan las electroválvulas para el procedimiento de limpieza automática del cabezal de mezcla.

**Tabla 3**

*Relé inteligente Clic 02*

---

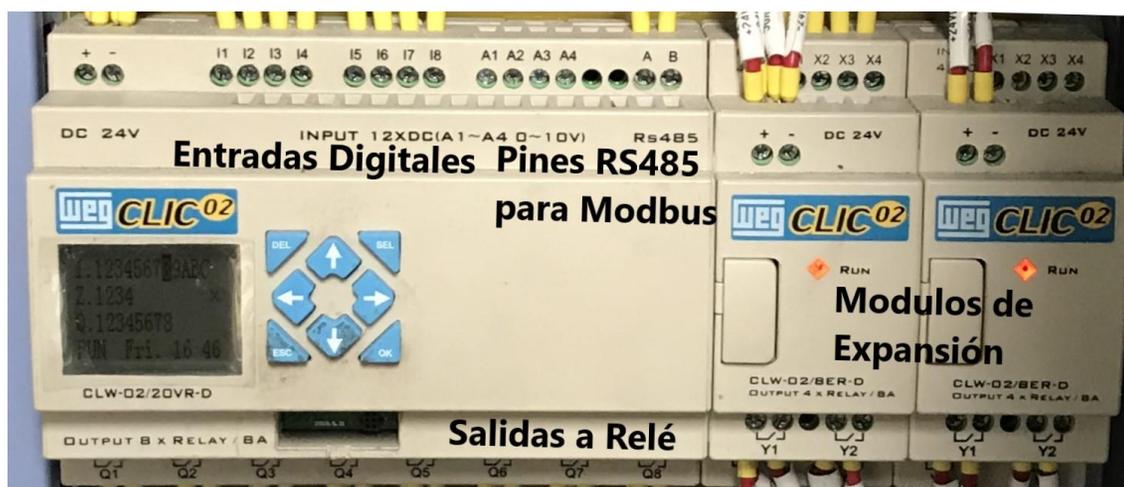
**Relé inteligente Clic 02**

<b>Fabricante</b>	WEG
<b>Modelo</b>	CLW-02/20VR-D
<b>Alimentación</b>	24 VDC

CONTINÚA



<b>Entradas</b>	Digitales: 8 a 24 VDC  Analógicas: 4 de 0 a 10 VDC
<b>Salidas</b>	8 salidas tipo relé
<b>Comunicación</b>	Modbus RTU



*Figura 25.* Relé inteligente Clic 02

#### 4.2.4. Convertidor RS 485 a USB

Este conversor sirve para pasar del medio físico RS485 (típico en comunicaciones Modbus) a USB para establecer comunicación entre el relé inteligente y el relé inteligente, esto permite enviar las órdenes desde la HMI hacia el relé inteligente con el fin de controlar los motores, bombas y demás componentes de la máquina.

**Tabla 4**  
*Conversor RS485 a USB*

<b>Conversor RS 485 a USB</b>	
<b>Fabricante</b>	DTECH
<b>Modelo</b>	DTECH-RS485-USB
<b>Alimentación</b>	24 VDC
<b>Interfaz de entrada</b>	RS485 – RS422
<b>Interfaz de salida</b>	USB 2.0



**Figura 26.** Conversor RS485 a USB

#### 4.2.5. Software

El software descrito en la tabla 5 es utilizado para el diseño de la interfaz HMI y realizar el control de movimiento de la herramienta que permite la elaboración del empaque de poliuretano.

**Tabla 5***Software utilizado por el nuevo sistema de control*

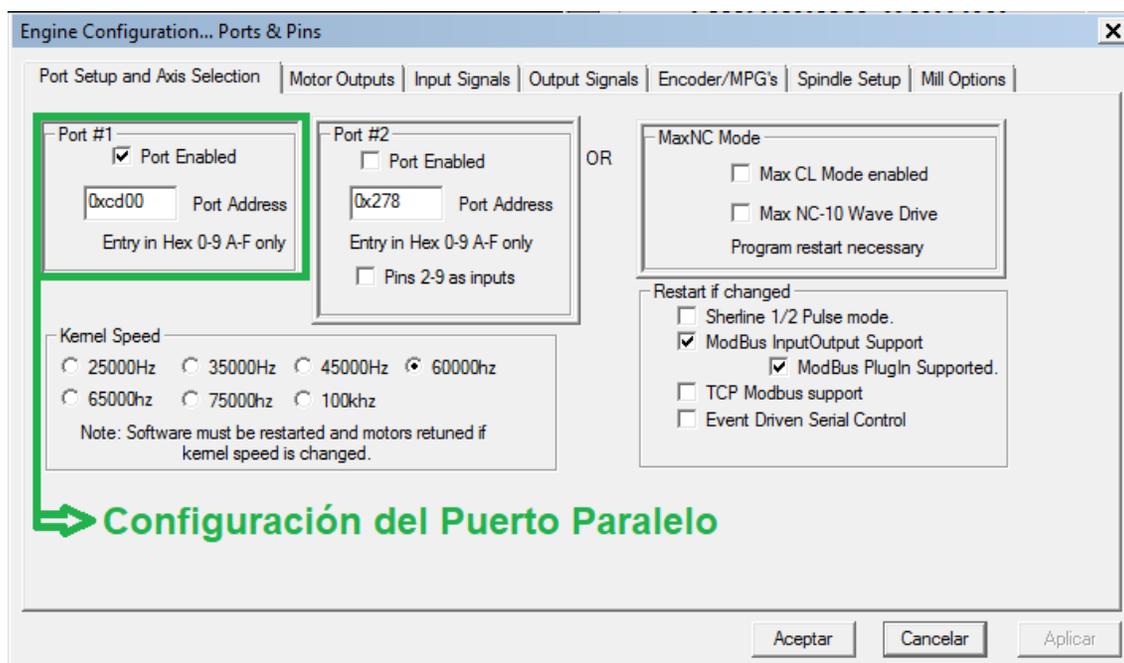
<b>Software utilizado por el nuevo sistema de control</b>		
<b>Programa</b>	<b>Distribuidor</b>	<b>Descripción</b>
Clic 02 Edit	WEG	Programar relés inteligentes WEG de la familia Clic
Mach3	Newfangled Solutions	Programa para control de movimiento mediante el procesamiento de diseños de código G
LazyCam	ArtSoft	Permite convertir un diseño de dibujo vectorial en las instrucciones necesarias de código G.
Screen 4	ArtSoft	Editor de pantallas destinadas al uso de Mach 3.

### **4.3. Programación y configuración de equipos**

#### **4.3.1. Configuración Mach 3 y tarjeta de control de movimiento**

Se realizan una serie de configuraciones en el software Mach3 que sirven para establecer la comunicación entre la interfaz HMI y la tarjeta de control de movimiento a través del puerto paralelo de PC.

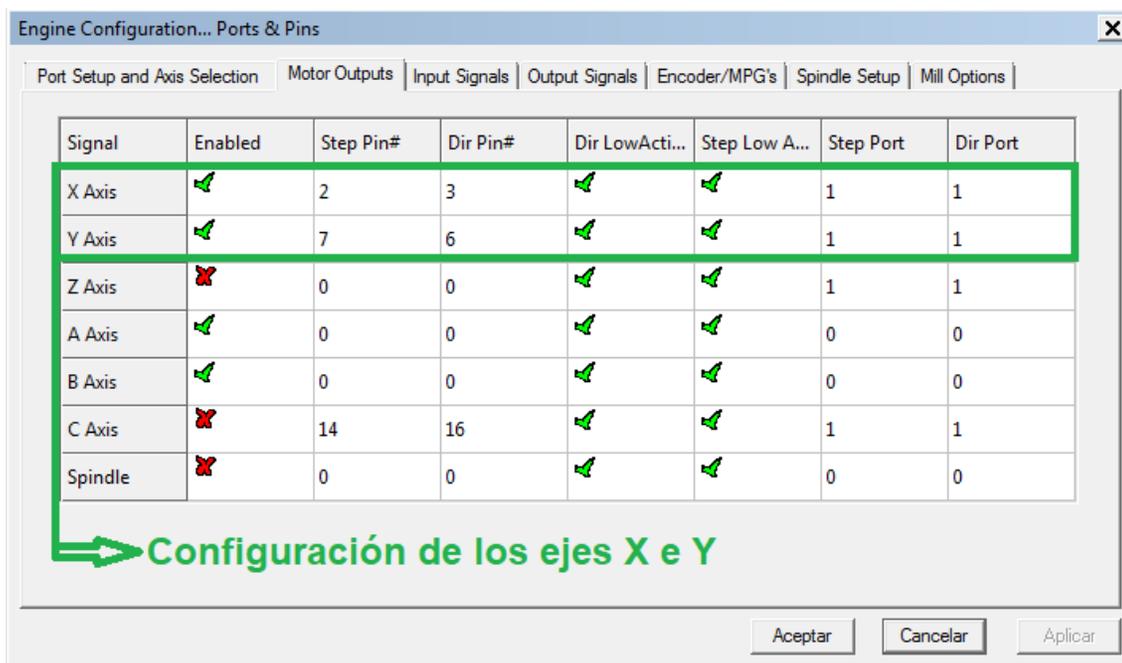
La primera parte consiste en la configuración del puerto paralelo, en la figura 27 se debe habilitar el puerto paralelo que se vaya a utilizar, para lo cual se debe colocar la dirección de los recursos del puerto, esto se puede encontrar en la configuración de dispositivos del computador en el apartado “Administrador de Dispositivos”. El resto de las configuraciones se dejan por defecto.



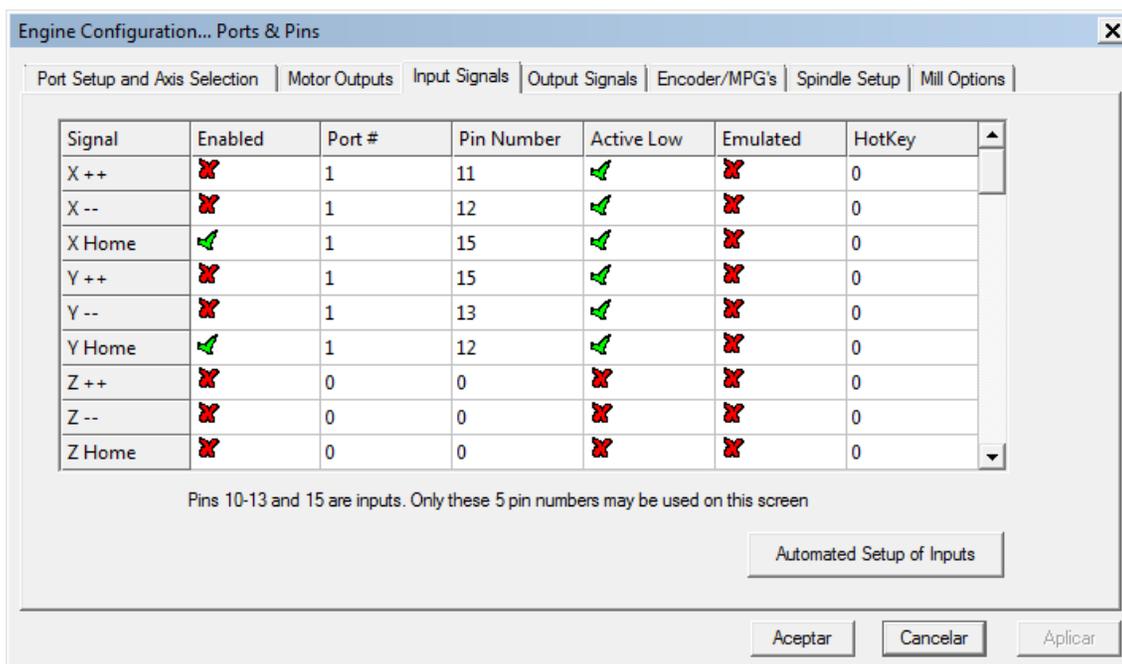
**Figura 27.** Configuración de puerto paralelo en software Mach 3.

Luego se procede a configurar los pines de salida del puerto paralelo que se vayan a utilizar para la generación de las señales de pulsos correspondientes a la posición y dirección de cada eje, en este caso se manejan dos ejes: eje X y eje Y (figura 28).

Luego se configura los pines de entrada para los sensores límites de cada eje (positivo y negativo) y de la señal de paro de emergencia, los pines que se pueden configurar como entradas son los pines 10 – 13 y 15 (figura 29).

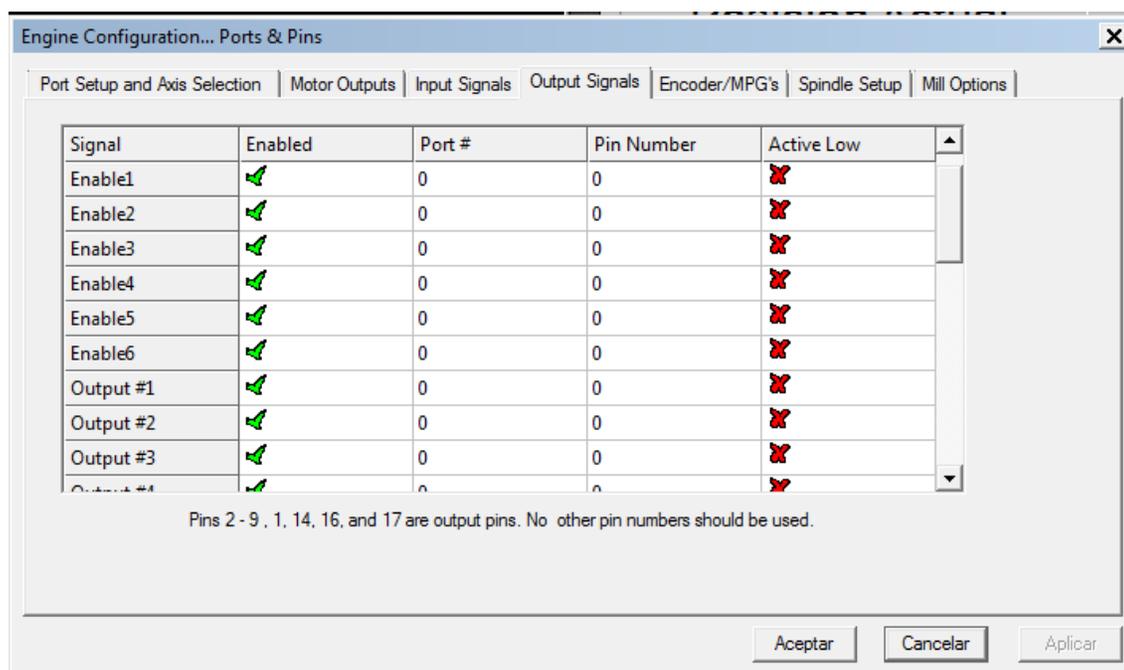


**Figura 28.** Habilidad de los ejes a utilizarse (X e Y)



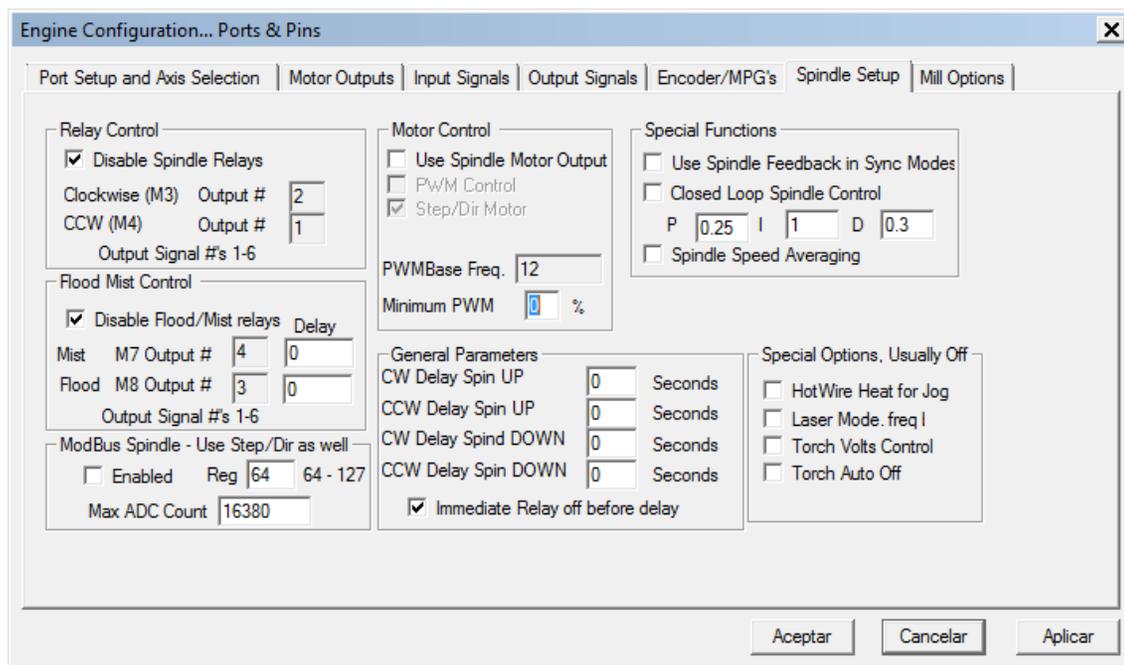
**Figura 29.** Habilidad de señales de sensores límites de carrera de los ejes en Mach 3

La configuración de las salidas se puede realizar para controlar elementos externos, en este caso el resto de los componentes (agitadores, bombas, electroválvulas) se controlan mediante el PLC por lo que estos ajustes se quedan sin configurar. Los pines que se pueden utilizar como salidas con los pines 1, 2 - 9, 14, 16 y 17.



**Figura 30.** Habilitación de componentes externos en Mach 3.

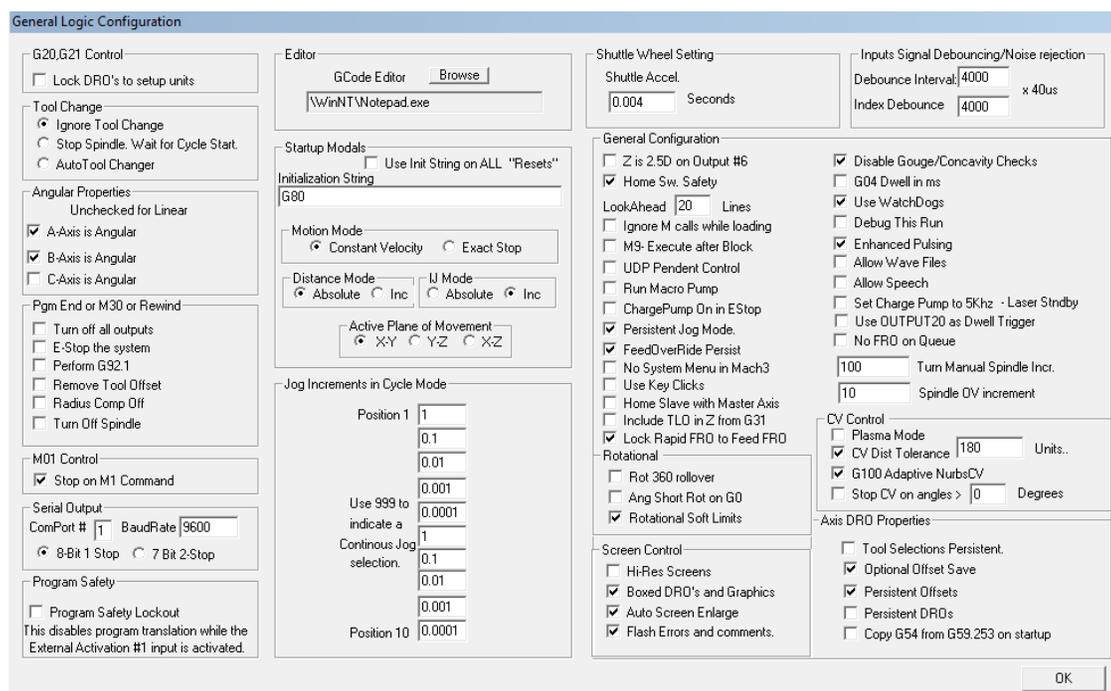
El software Mach3 también permite controlar la herramienta de una máquina CNC mediante una señal PWM que puede servir como control de velocidad, sin embargo, en este caso la herramienta no necesita que es el cabezal de mezcla no necesita control de velocidad por lo que esta función no es requerida y los ajustes de la figura 31 se quedan con sus valores por defecto.



**Figura 31.** Configuración señales PWM en Mach 3

Luego en la sección Config > General Config de la barra de herramientas del Mach3 se puede realizar ciertas configuraciones generales de la máquina como las siguientes:

- Modo de movimiento: velocidad constante, se refiere al control de velocidad de cada eje de movimiento.
- Modo de distancia: absoluto, las distancias en las instrucciones del código G se interpretan como absolutas.
- Plano de movimiento: X-Y, el movimiento de posicionamiento de la herramienta se realiza en el plano XY.
- La opción de rechazo de rebote o ruido (Noise rejection) permite configurar el tiempo de detección de los pulsos dados por los sensores límites de cada eje, en este caso se ha configurado a 4000 x 40 es decir 160 milisegundos.



**Figura 32.** Configuración general de Mach 3.

En la sección Config > Homing Limits se puede configurar la velocidad de movimiento para regresar a la posición Home, así como la dirección en la que se encuentra la posición Home de la máquina (figura 33).

Finalmente, en la sección Config > Motor Tuning se puede realizar la configuración y calibración del movimiento y posicionamiento de los ejes X e Y, los cuales están controlados por sus respectivos servodrives y servomotores. Para esto se debe tomar en cuenta que los servodrives de la máquina están diseñados para trabajar con señales de pulsos a una frecuencia de 500Khz, es decir con pulsos de 2 microsegundos de período máximo.

Los siguientes parámetros son relevantes para el correcto funcionamiento de los servodrives y la calibración de la distancia recorrida por cada eje:

- Pasos por revolución: Es el número de pulsos por cada revolución del servomotor. Este parámetro es importante para la calibración de las distancias recorridas por los servomotores.
- Velocidad: La velocidad máxima de movimiento de los ejes expresada en milímetros por minuto. Este parámetro está limitado por la frecuencia de funcionamiento del puerto paralelo del PC, el cual se ha establecido en 60 KHz y es importante para controlar el ancho del empaque de poliuretano.
- Aceleración: La aceleración de los ejes que se aplica en la aceleración y desaceleración del servomotor hasta y desde la velocidad nominal de funcionamiento. Este parámetro es importante para obtener bordes menos redondeados en el diseño del empaque de poliuretano.

En la figura 34 se muestra la configuración del eje X, además de las rampas de aceleración y desaceleración hasta y desde la velocidad máxima de funcionamiento fijada en 7200 [mm/min].

Motor Home/SoftLimits

Entries are in setup units.

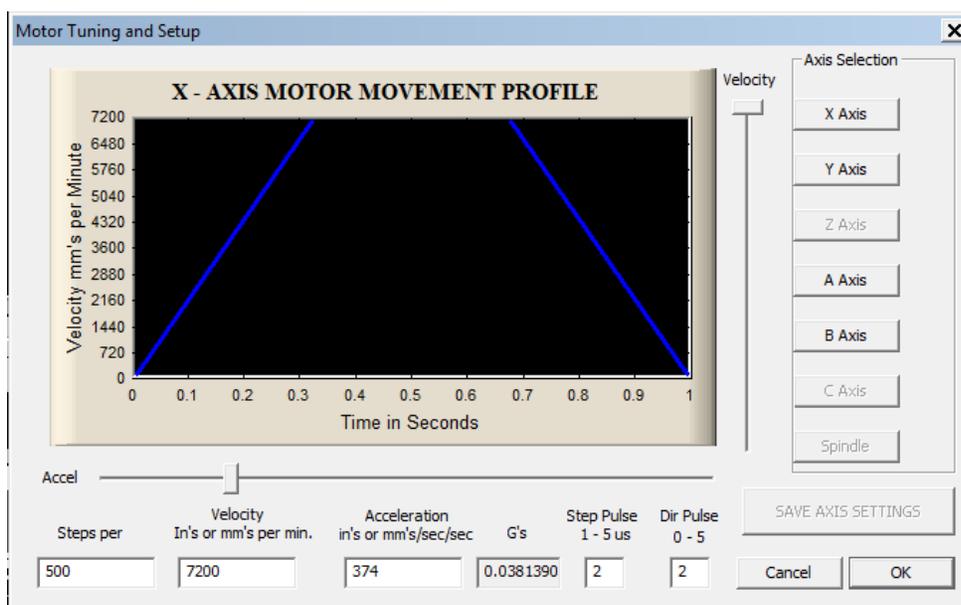
Axis	Reversed	Soft Max	Soft Min	Slow Zone	Home Off.	Home N...	Auto Zero	Speed %
X	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✔	✔	77
Y	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✔	✔	77
Z	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✘	✔	20
A	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✘	✔	20
B	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✘	✔	20
C	✘	100.00	-100.00	1.00	0.0000	✘	✔	20

G28 home location coordinates

X	<input type="text" value="0"/>	A	<input type="text" value="0"/>
Y	<input type="text" value="0"/>	B	<input type="text" value="0"/>
Z	<input type="text" value="0"/>	C	<input type="text" value="0"/>

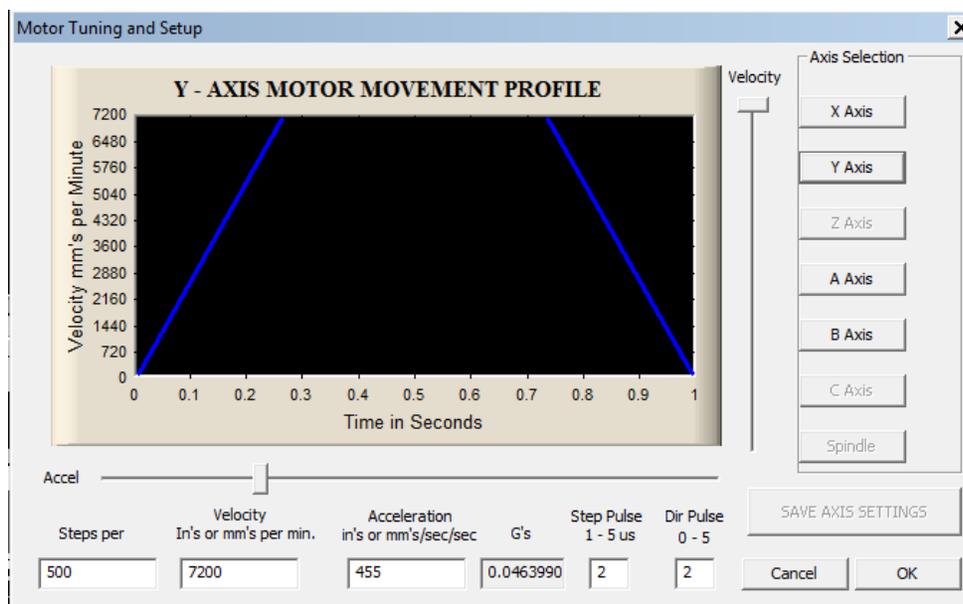
OK

**Figura 33.** Configuración velocidad regreso a posición Home



**Figura 34.** Configuración del eje X en Mach 3

En la figura 35 se muestra la configuración del eje Y, además de las rampas de aceleración y desaceleración hasta y desde la velocidad máxima de funcionamiento fijada en 7200 [mm/min].



**Figura 35.** Configuración del eje Y en Mach 3

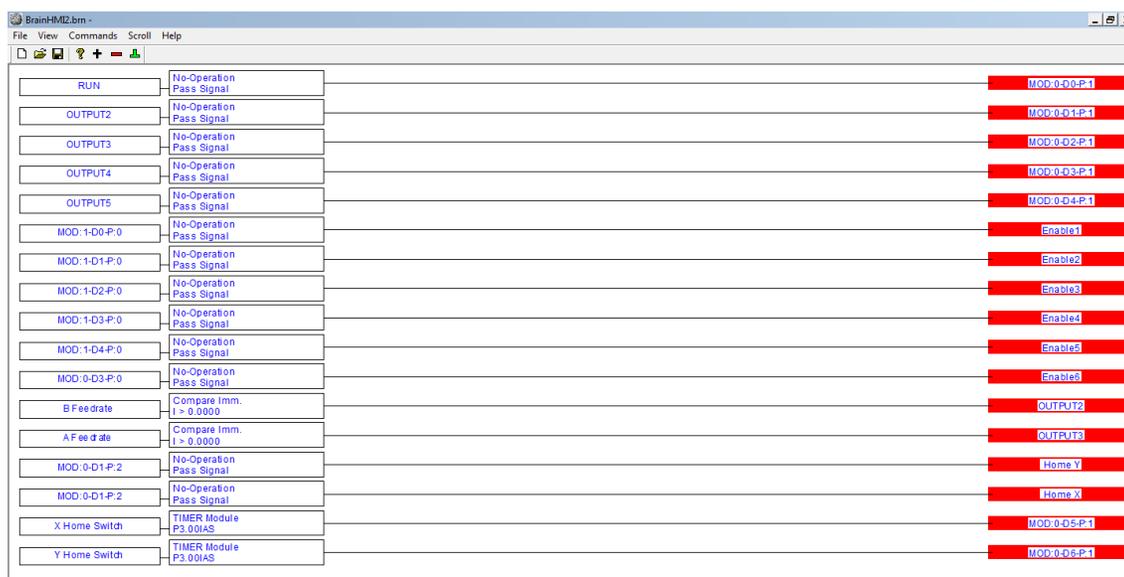
### 4.3.2. Programación de macros

El software Mach3 también permite programar macros de usuario para controlar diferentes funciones del sistema o enviar información a dispositivos externos, como es el caso del relé inteligente Clic02 (controlado por Modbus).

Estas macros se dividen en 2:

- Brains: Son macros programadas mediante bloques de función y se ejecutan periódicamente en segundo plano.
- Script: Son macros que utilizan el lenguaje Visual Basic y se ejecutan cuando se activan diferentes elementos de la interfaz HMI como botones e indicadores.

En la figura 36 se puede ver la programación de un macro de usuario del tipo Brain, el cual permite indicar si el programa está en modo Simulación, activar subrutinas en la programación del relé inteligente, indicar la posición de la herramienta y activar leds internos para visualización del estado de los componentes de la máquina dentro de la interfaz HMI.



**Figura 36.** Macro tipo Brain utilizado en interfaz HMI

En la figura 37 se muestran marcados con un cuadro rojo los elementos de la interfaz HMI que tienen programados macros del tipo Script y que se ejecutan cuando son activados.



**Figura 37.** Elementos de la interfaz HMI que utilizan macros

A continuación, se describe cada script indicado en la figura 37.

**Script 1:** En el script 1 (figura 38), se condiciona la carga del diseño en código G cuando el sistema está en la condición Paro de Emergencia, esto con la finalidad de evitar un problema que hace que el software realice una rutina de trabajo indeseada.

**Script 2:** En el script 2 (figura 39), se encera la posición de los ejes X e Y, indicando la ubicación actual como la posición Cero de la máquina y por lo tanto del diseño del empaque.

**Script 3:** En el script 3 (figura 40), la herramienta se mueve hacia la posición Cero de la máquina para iniciar la fabricación del empaque.

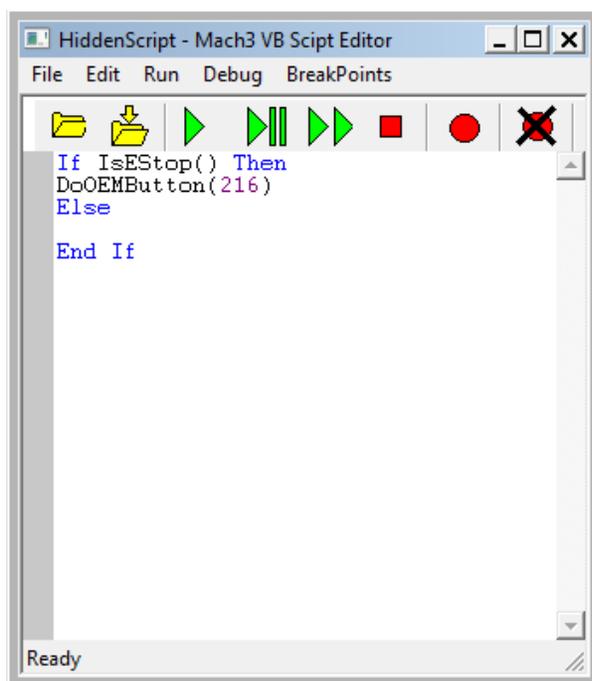
**Script 4:** En el script 4 (figura 41), la herramienta se mueve hacia la posición Home de la máquina para realizar la rutina de limpieza del cabezal.

**Script 5:** En el script 5 (figura 42), inicia la rutina de prueba de mezcla para observar que la mezcla de los químicos sea consistente.

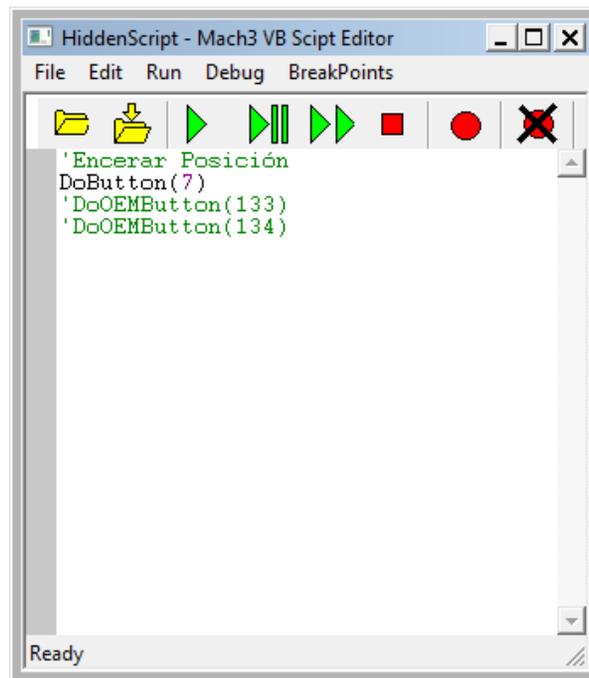
**Script 6:** En el script 6 (figura 43), se realiza la rutina de limpieza para el cabezal de mezcla.

**Script 7 y 8:** En los scripts 7 y 8 (figura 44), los botones activan salidas internas para enviar la orden de activar/desactivar el estado de simulación del sistema.

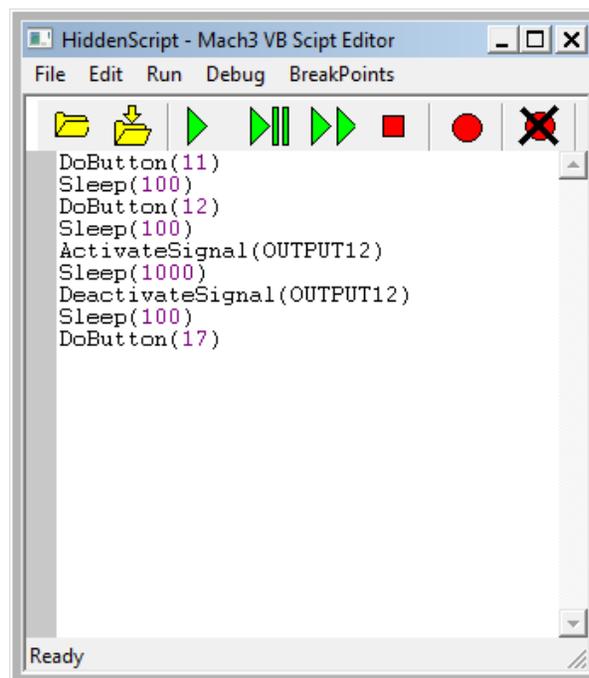
**Script 9 y 10:** En los scripts 9 y 10 (figura 45), los botones activan salidas internas para enviar la orden de activar/desactivar el mezclador del cabezal de mezcla, esto con fines de comprobación del giro del eje mezclador.



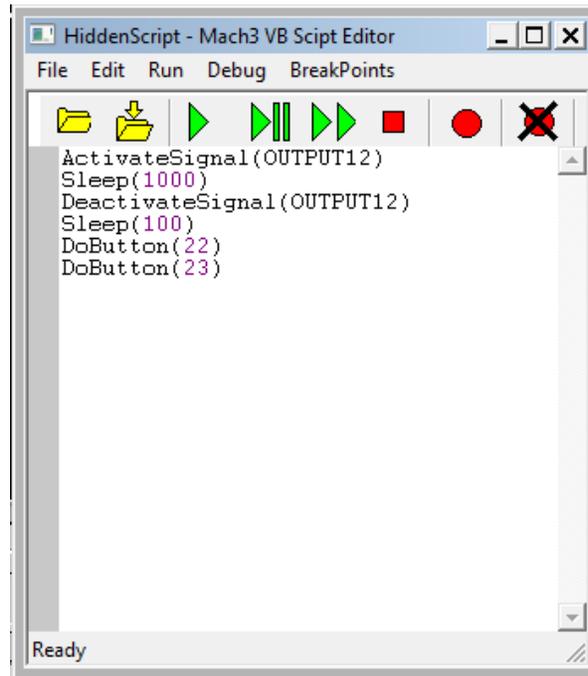
**Figura 38.** Script de botón Paro de emergencia



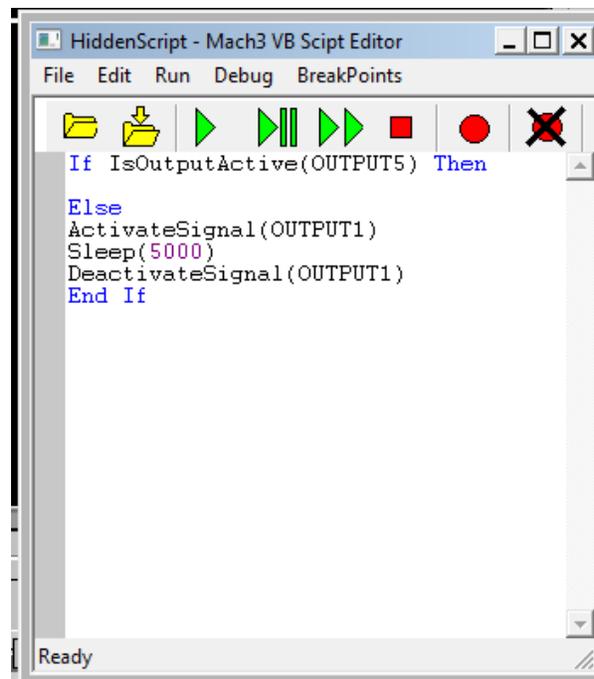
*Figura 39.* Script de botón Posición Inicial



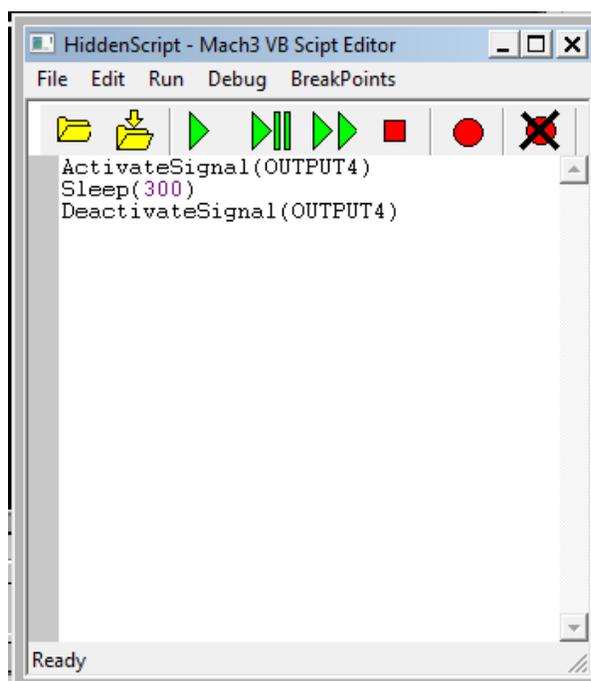
*Figura 40.* Script de botón Cero XY



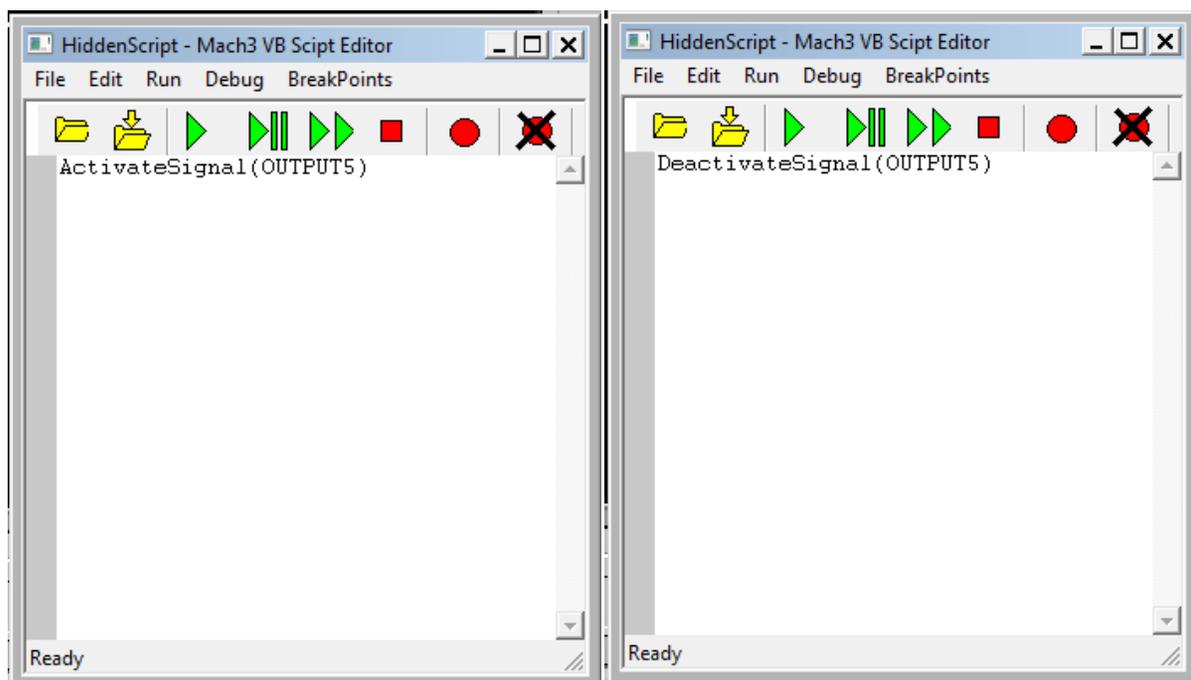
*Figura 41.* Script de botón Home XY



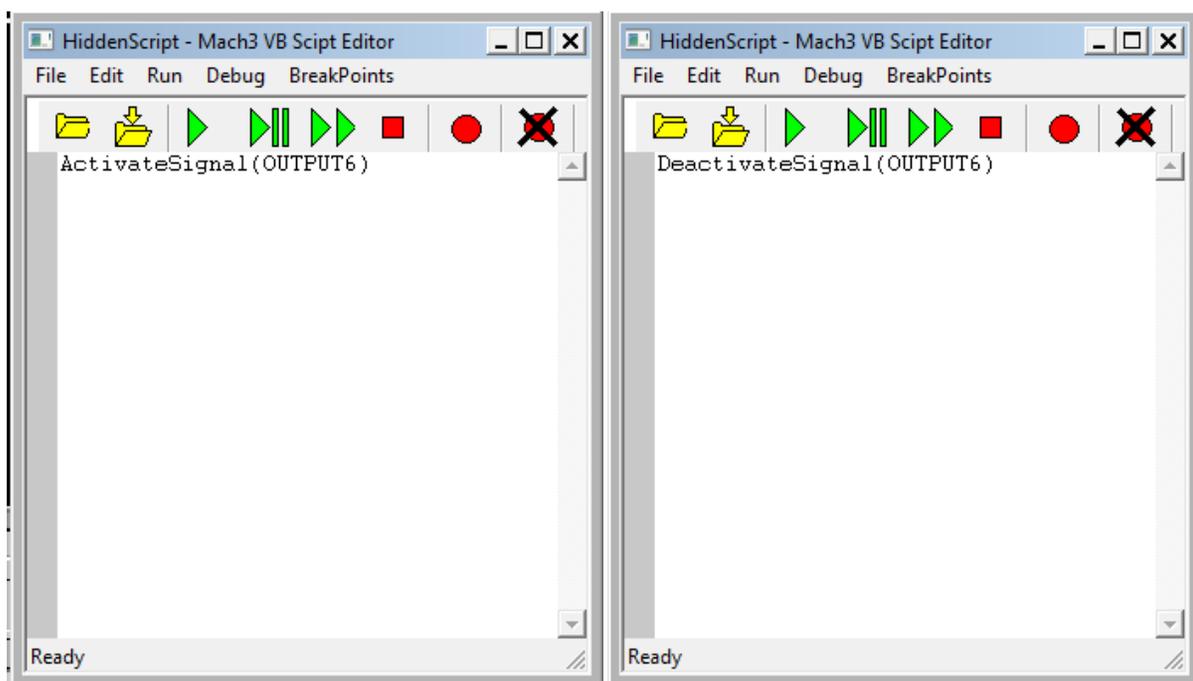
*Figura 42.* Script de botón Iniciar Test



*Figura 43.* Script de botón Iniciar Limpieza



*Figura 44.* Script para activar/desactivar la simulación



*Figura 45.* Script para activar/desactivar el mezclador de cabezal

#### 4.3.3. Programación de relé inteligente Clic 02

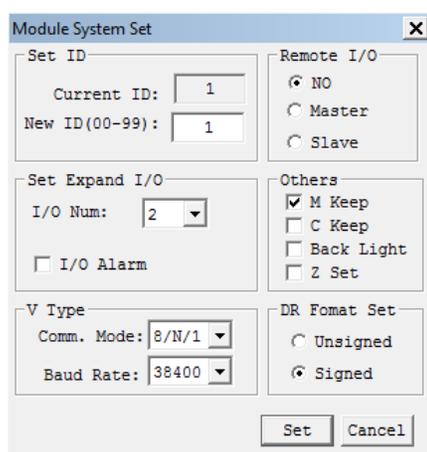
La lógica programada en el Relé Inteligente Clic02 permite realizar las siguientes rutinas dependiendo del modo de funcionamiento de la máquina:

- Rutina de trabajo: Durante a fabricación del empaque, la máquina enciende las bombas de polioli e isocianato para su envío hacia el cabezal y al mismo tiempo se enciende el eje del cabezal de mezcla para finalmente verter la mezcla en el trayecto de la herramienta.
- Rutina de limpieza: Después de la elaboración de cada empaque se programa una rutina de limpieza que controla las electroválvulas para abrir paso al químico de limpieza hacia el cabezal de la mezcla. Esta rutina se implementa después de cada empaque elaborado debido a que el poliuretano generado se puede secar rápidamente dentro del cabezal y obstruir el paso de los químicos para el siguiente procedimiento.

- Rutina de recirculación: Esta rutina está programada para ser realizada diariamente debido a que la máquina está diseñada para un uso continuo y debido a que la máquina se utiliza eventualmente se necesita realizar una rutina que mantenga en movimiento los químicos poliuretano e isocianato y así evitar el taponamiento de las mangueras y el cabezal. Por lo tanto, en esta rutina se encienden los agitadores de cada tanque, así como sus bombas y se mantienen en recirculación; al mismo tiempo se enciende la bomba de agua y la resistencia calefactora para calentar ambos tanques a una temperatura de 60°C. Esta rutina se mantiene activa durante dos horas.

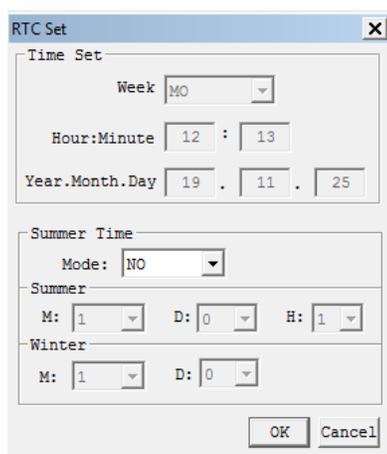
Además de la programación del relé inteligente, se necesita establecer las configuraciones básicas para el funcionamiento del programa y la rutina de recirculación diaria.

La figura 46 muestra la configuración del relé inteligente, el cual tiene un ID=1 para la comunicación Modbus, el formato de comunicación y velocidad de transmisión de la comunicación, las marcas internas M son remanentes y los registros internos DR son enteros con signo para recibir los datos de posición de los ejes desde el software Mach3.



**Figura 46.** Configuración Modbus de relé Clic 02

La figura 47 muestra la configuración del reloj interno del relé inteligente, la cual se debe establecer para asegurar que la rutina de recirculación se realice a la hora programada.



*Figura 47.* Configuración reloj de relé Clic 02

### **Consumo de energía eléctrica de rutina de recirculación**

La rutina de conservación del isocianato consiste en encender la niquelina ubicada en el tanque de agua y la bomba, con la finalidad de circular el agua a través de las camisas de los tanques de polioliol e isocianato. Con esto se logra evitar que el isocianato alcance una temperatura igual o inferior a 15 grados centígrados que es recomendada por el fabricante de dicho químico.

Para establecer el consumo de energía eléctrica se realizó la medición de corriente en las fases del voltaje de alimentación de la máquina.

En la primera línea se midió un valor de 6.3 A, en la segunda un valor de 6.7 A y en la tercera un valor de 7.1 A como se muestra en la figura 48.



**Figura 48.** Corriente medida las líneas de alimentación trifásica de la máquina

Al conocer las corrientes de cada línea se puede calcular la potencia consumida en KVA mediante la siguiente formula:

$$S_1 = V_{L1}I_{L1} = (220 V)(6.3 A) = 1.39 KVA$$

$$S_2 = V_{L2}I_{L2} = (220 V)(6.7 A) = 1.47 KVA$$

$$S_3 = V_{L3}I_{L3} = (220 V)(7.1A) = 1.56 KVA$$

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3 = 4.42 KVA$$

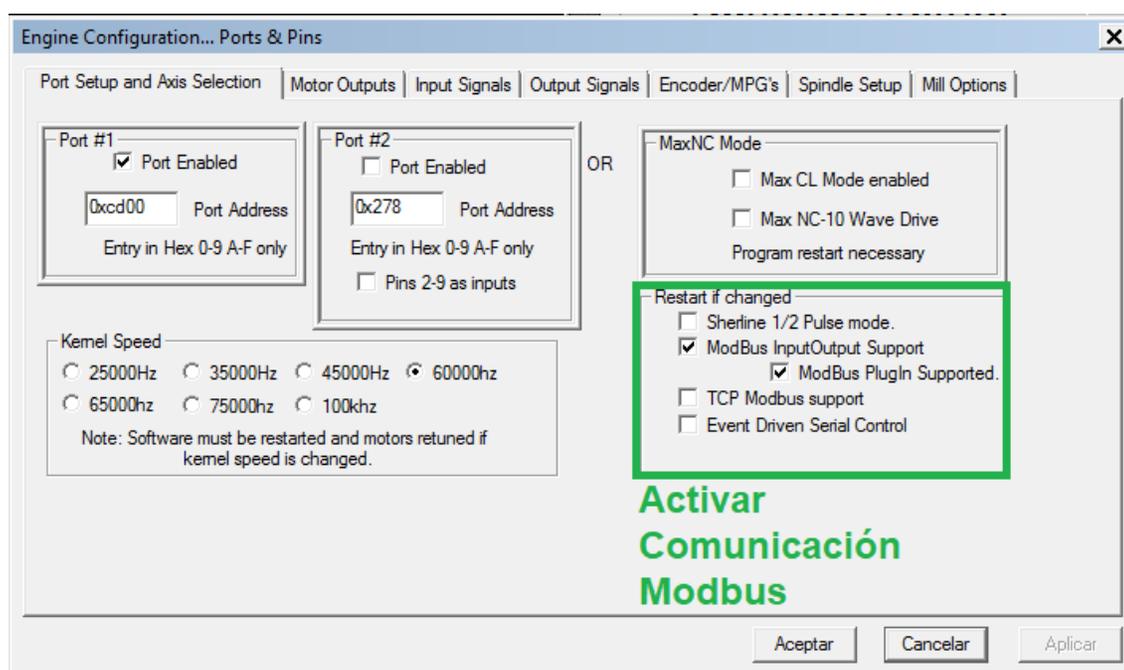
El consumo de energía de la maquina es de 4.42 KVA durante la rutina de recirculación.

#### 4.3.4. Configuración de comunicación Modbus

Para la comunicación entre el programa Mach3 y el relé inteligente Clic02 se utiliza el protocolo Modbus RTU. En este caso es necesario utilizar un conversor RS-485 a USB conectado a un puerto USB del computador.

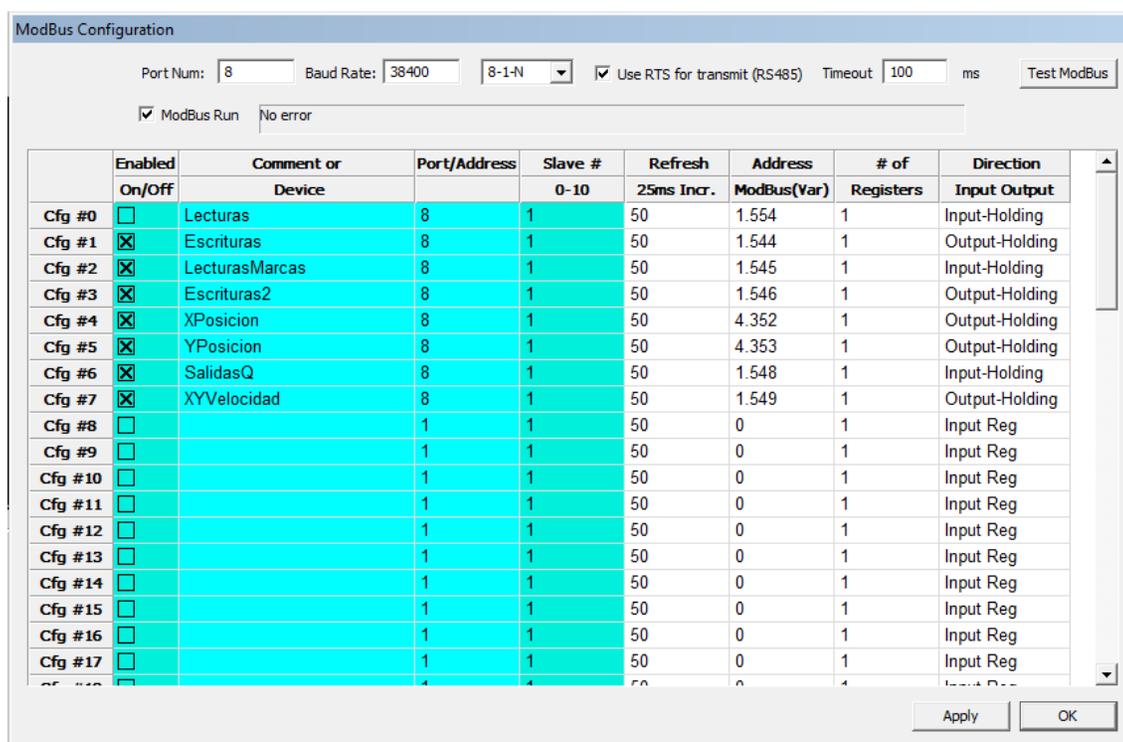
El computador actuará como Maestro Modbus y el Relé Inteligente Clic02 como esclavo Modbus utilizando el ID 1 para establecer la comunicación, para lo cual se necesita configurar ambos lados.

En la figura 49, se muestra la configuración necesaria para activar la comunicación Modbus en el software Mach3. En la sección Config > Ports and Pins, se debe activar las opciones de “Soporte de Entrada/Salida Modbus” y “Plugin Modbus Soportado”.



**Figura 49.** Configuración comunicación Modbus – Mach 3

Después de activar la comunicación Modbus RTU, se debe establecer las direcciones de los registros a leer y escribir en una tabla de direcciones ubicada en la sección Function Configs > Setup Serial Modbus Control como se muestra en la figura 50.



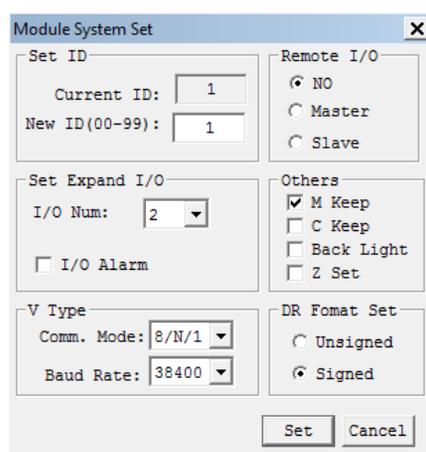
**Figura 50.** Configuración parámetros comunicación Modbus

Las direcciones de los registros configurados se deben colocar en decimal, se debe indicar además el número de registros continuos a leer o escribir, el número del esclavo y el número de puerto por el que se realiza la configuración, en este caso el puerto es el COM8.

El formato para la comunicación Modbus RTU consiste en:

- Línea de datos física: RS 485
- Trama de datos: 8 bits de datos, 1 bit de parada y sin paridad (8-1-N).
- Velocidad de transmisión: 38400 baudios.

Esta configuración también se comprueba en el relé inteligente Clic02 como se muestra en la figura 51.



**Figura 51.** Configuración Modbus Clic 02

### 4.3.5 Programación de drives y servodrive

#### Drive para el motor de mezclado en el cabezal

Este drive controla el motor que hace girar el eje para la mezcla del polioli e isocianato en el cabezal. En este caso el drive está dimensionando para trabajar con el motor de 1 HP a 220Vac del cabezal.

Los siguientes parámetros son los más relevantes para su funcionamiento:

**Tabla 6**

*Parámetros de drive para el motor de mezclado en el cabezal*

#### Configuración de drive para mezcla de cabezal

Parámetro	Significado	Valor	Descripción
P1-00	Frecuencia máxima	100 Hz	Máxima frecuencia de salida del drive
P1-05	Frecuencia mínima	30 Hz	Mínima frecuencia de salida del drive

CONTINÚA



P1-09	Tiempo de aceleración	de 0.2 segundos	Tiempo para rampa de aceleración al arrancar el motor
P1-10	Tiempo de desaceleración	de 0.2 segundos	Tiempo para rampa de desaceleración al arrancar el motor
P2-00	Fuente de frecuencia maestra	0: entrada por teclado	La frecuencia de operación se cambia por el teclado.
P2-03	Fuente de operación	2: operación por terminales externos	Arranque-parada del drive se controla mediante las entradas digitales.
P3-05	Relé de salida multifuncional	8: falla	Salida a relé que indica cuando el drive está en falla.

Para el correcto funcionamiento de la mezcla del cabezal, el drive está configurado con una frecuencia de 80 Hz actualmente. Esto debido a que a menores velocidades la mezcla no resulta homogénea.

### **Drives para bombas de polioliol e isocianato**

Estos drives controlan la velocidad de las bombas de polioliol e isocianato, las cuales en este caso son de ½ HP a 220VAc. La velocidad de estas bombas determina el grosor del empaque. La referencia de velocidad está dada por una señal analógica de 0 – 10 Vdc regulada por un potenciómetro externo en la puerta del tablero de control.

Los parámetros en la tabla 7 son los más relevantes y han sido configurados en los valores indicados para un funcionamiento adecuado. El resto de parámetros se configuran en los valores por defecto.

**Tabla 7***Parámetros de drive para bombas de poliol e isocianato***Configuración de drive para mezcla de cabezal**

<b>Parámetro</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
P1-00	Frecuencia máxima	60 Hz	Máxima frecuencia de salida del drive
P1-05	Frecuencia mínima	15 Hz	Mínima frecuencia de salida del drive
P1-09	Tiempo de aceleración	de 0.2 segundos	Tiempo para rampa de aceleración al arrancar el motor
P1-10	Tiempo de desaceleración	de 0.2 segundos	Tiempo para rampa de desaceleración al arrancar el motor
P2-00	Fuente de frecuencia maestra	1: entrada DC de 0 a 10 V	La frecuencia de operación se controla por entrada analógica (potenciómetro)
P2-03	Fuente de operación	2: operación por terminales externos	Arranque-parada del drive se controla mediante las entradas digitales.
P3-05	Relé de salida multifuncional	8: falla	Salida a relé que indica cuando el drive está en falla.

En este caso, ambos drives tienen la misma configuración y lo que cambia es la velocidad de funcionamiento de cada una para obtener una relación de 0.6 (siempre con mayor cantidad de polirol) entre ambos químicos para obtener una mezcla adecuada para ser utilizada como empaque de tablero.

### **Servodrives para control de movimiento**

Los servodrives permiten controlar la velocidad y posición de los servomotores acoplados a ambos ejes de movimiento (ejes X e Y). El modo de funcionamiento de ambos servodrives se configura como control de posición, para lo cual los servodrives necesitan recibir las señales de pulsos que definen la posición final, velocidad y dirección de cada movimiento. Para este fin se utiliza el puerto paralelo del PC y la tarjeta de control de movimiento, además del software Mach3 que se encarga de generar los trenes de pulsos adecuados para funcionamiento de los servodrives.

Los siguientes parámetros son los más relevantes para su funcionamiento:

**Tabla 8**  
*Parámetros de servodrives que controlan los ejes X e Y*

#### **Configuración de drive para mezcla de cabezal**

<b>Parámetro</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
Pr0.01	Modo de control	0: posición	Modo de funcionamiento de drive en control de posición.
Pr4.10	Selección de salida SO1	00000001h: salida de alarma	La salida 1 se configura como indicador de alarma de servodrives.

**CONTINÚA**



Pr0.07	Modo de entrada de pulso	de 3: pulso + signo		El control de movimiento requiere tren de pulsos para la posición y dirección del servodrive.
Pr0.09	Numerador de engranaje electrónico	de 1167: eje X 1000: eje Y		Configuración del numerador para compensar engranaje externo
Pr0.10	Denominador de engranaje electrónico	de 1167: eje X 1000: eje Y		Configuración del numerador para compensar engranaje externo
Pr4.00	Selección de la entrada SII	de la 00000003h: entrada de servo-on en modo de control de posición		La entrada digital 1 se configura como habilitación del servodrive

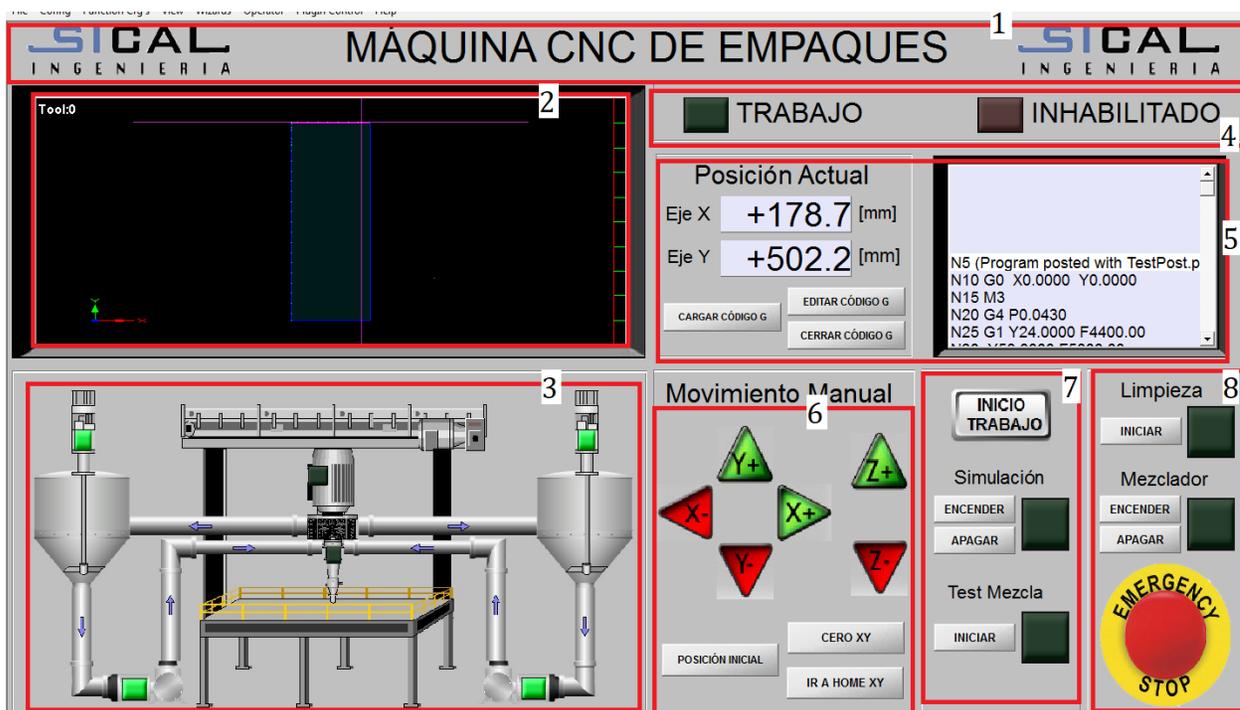
---

La principal diferencia en la configuración de ambos servodrives es el valor del engranaje electrónico, esta configuración permite simular un engranaje interno para compensar la relación de la caja de reducción que está acoplada a los ejes de cada motor y que aumenta la fuerza de torsión para el movimiento de cada eje. De esta manera se iguala la velocidad de movimiento de cada eje para evitar diferencias en la distancia recorrida y la posición final de la herramienta.

## 4.4. Diseño de la pantalla HMI

### 4.4.1. Distribución de elementos

La distribución de la HMI para monitoreo y control de la máquina de empaques se muestra en la figura 52:



*Figura 52.* Elementos de la pantalla HMI

- 1: Título principal y logo de la empresa
- 2: Visualización de trayectoria de la herramienta
- 3: Monitoreo de activación – desactivación de los componentes que conforman la maquina
- 4: Estado actual del sistema: Inhabilitado o en trabajo

5: Carga, modificación y visualización del diseño en código G.

6: Mandos para movimiento manual de la herramienta y mandos de posicionamiento.

7: Mandos para elaboración del empaque y simulación de trayectoria

8: Mandos para rutinas de limpieza y paro de emergencia en HMI.

#### **4.4.2. Condiciones de operación**

Para el manejo de la Interfaz HMI se han colocado ciertas condiciones para la operación de los diferentes mandos y controles con la finalidad de evitar errores por parte de los usuarios durante el manejo de la máquina de empaques:

- Paro de emergencia: Si el botón paro de emergencia del HMI o de la puerta del gabinete de control están presionados, el sistema entrará en modo inhabilitado lo cual restringe la activación de todos los mandos excepto los destinados a la carga del diseño en código G.
- Carga del diseño en código G: Para poder cargar el diseño en código G es necesario tener el sistema en modo Inhabilitado con el fin de evitar que ciertas instrucciones de código G se ejecuten al cargar el archivo inicialmente.
- Modo de simulación: Cuando la opción de simulación está habilitada, el usuario puede realizar una prueba del diseño cargado y asegurarse de que las dimensiones del empaque sean las adecuadas. En esta situación la herramienta realizará el recorrido con la trayectoria definida pero no activará las electroválvulas que permiten el paso de los químicos polioli e isocianato hacia el cabezal de mezcla.
- Modo test e iniciar trabajo: Cuando se haya verificado el trayecto y las dimensiones del diseño, se procede a la elaboración del empaque para lo cual es necesario ejecutar la

opción de Test Mezcla en la posición de Home, esto tiene la función de arrojar la mezcla por unos instantes en el depósito de desechos para constatar que las electroválvulas están funcionando correctamente y que la mezcla es homogénea para iniciar el diseño del empaque. Una vez se haya realizado el test de la mezcla se puede presionar el botón Inicio Trabajo para proceder con la elaboración del empaque.

#### **4.5. Gabinete de control**

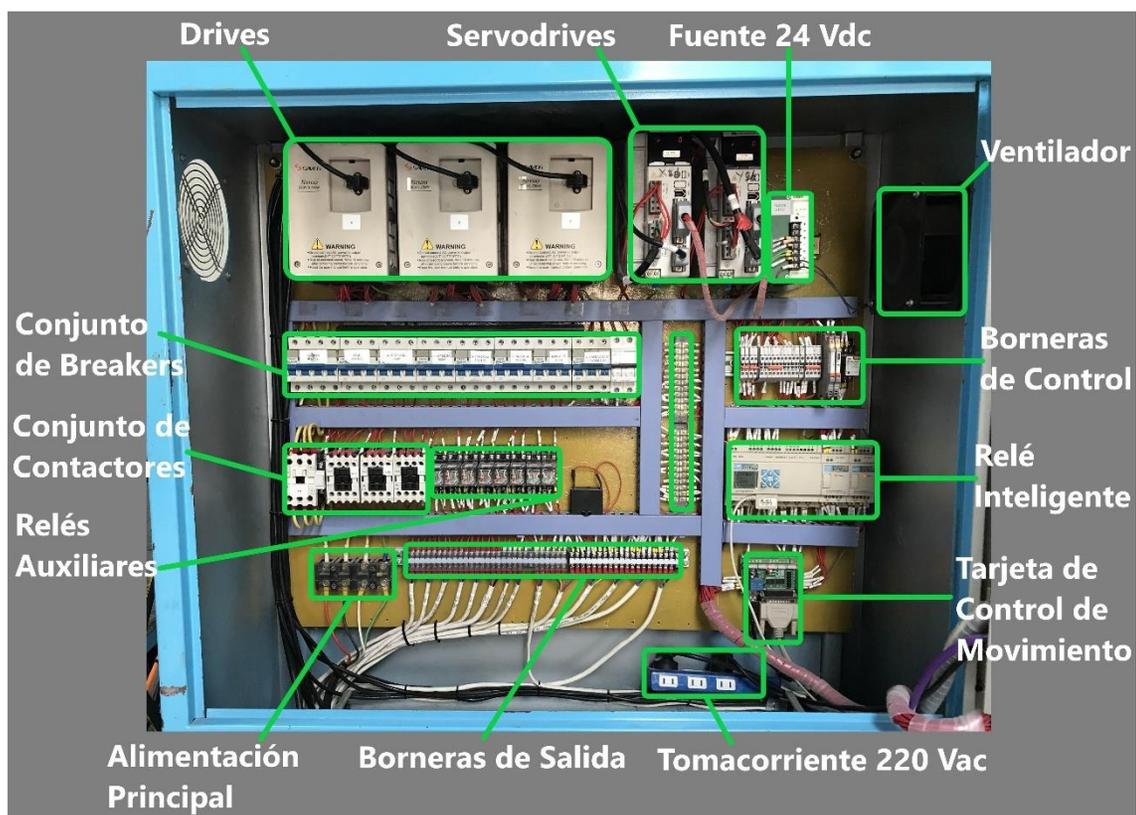
El gabinete de control ha sido modificado levemente puesto que ha sido necesario retirar elementos anteriores como los conectores de puerto paralelo y tarjetas optoacopladas, así como la redistribución de relés auxiliares. Los cambios en el gabinete se pueden evidenciar en la parte interna y externa, los cambios que se han realizado al gabinete de control se describen a continuación.

##### **4.5.1. Disposición de los equipos nuevos**

En la parte interna se han colocado los siguientes componentes nuevos:

- Relé inteligente Clic 02 y módulos de expansión
- Tarjeta de control de movimiento
- Relés auxiliares
- Lotes de borneras

Todos estos elementos se pueden observar en la Figura 53:



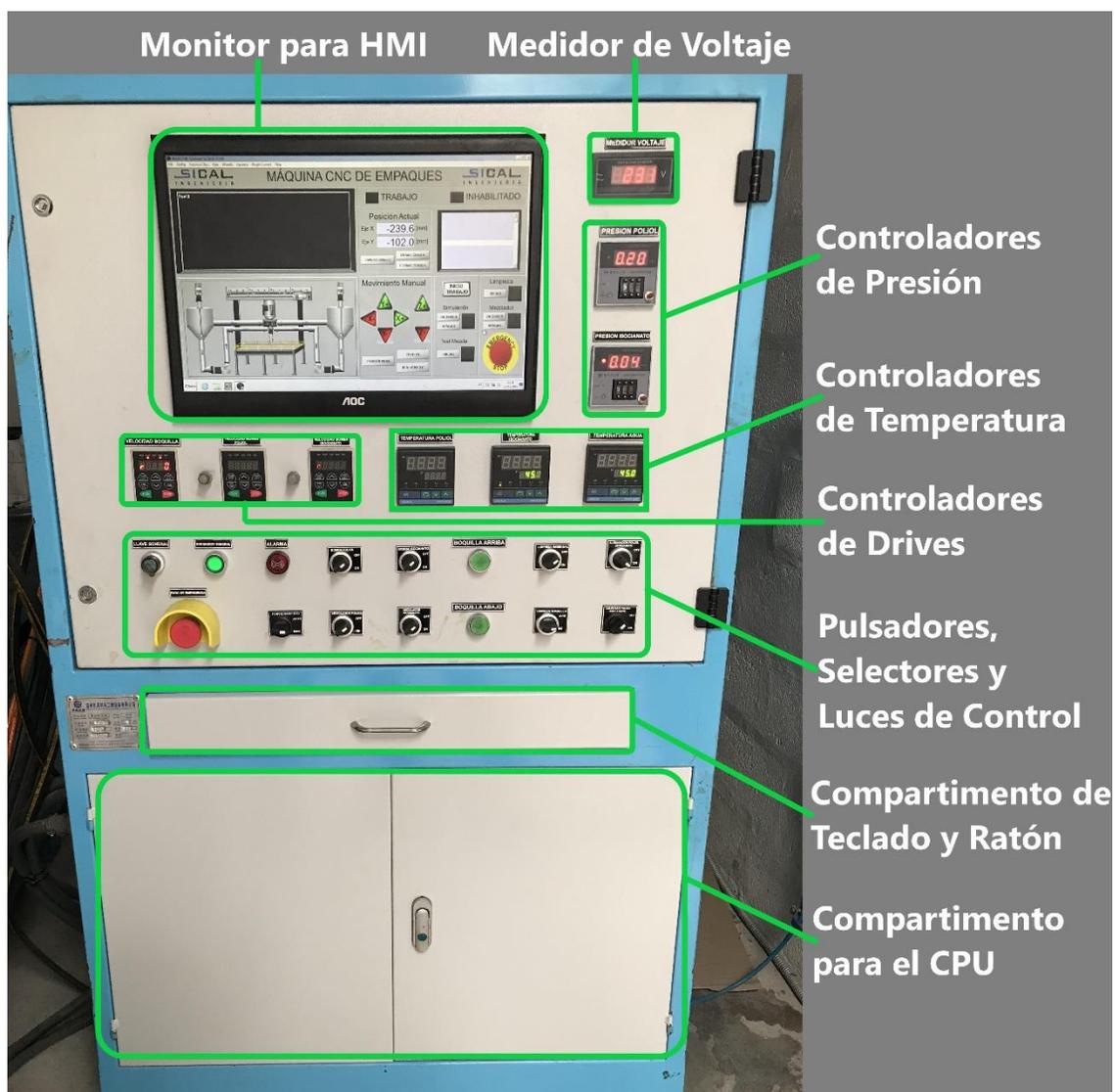
*Figura 53.* Distribución interna del gabinete de control

#### 4.5.2. Diseño de puerta externa

La puerta externa en la figura 54, ha sido modificada con los siguientes cambios:

- Inclusión de pulsador para paro de emergencia
- Inclusión de encendido de bomba de agua y resistencia calefactora.
- Inclusión de limpieza del cabezal por aire o dicloruro
- Cambio de pulsadores por selectores para facilitar la interacción con el usuario.

Todos los cambios descritos se pueden visualizar en la figura 54:



**Figura 54.** Distribución externa del gabinete de control con los cambios realizados

## CAPÍTULO V

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 5.1. Pruebas iniciales

Una vez comprobado el funcionamiento del sistema de control en cuanto al movimiento y seguimiento de la trayectoria del diseño en código G, se procede a realizar las pruebas de fabricación del empaque de poliuretano.

En las primeras pruebas realizadas se puede comprobar algunos problemas en el acabado final del empaque, estos defectos se describen a continuación:

#### **Problema 1: Consistencia y acabado de la mezcla de poliuretano.**

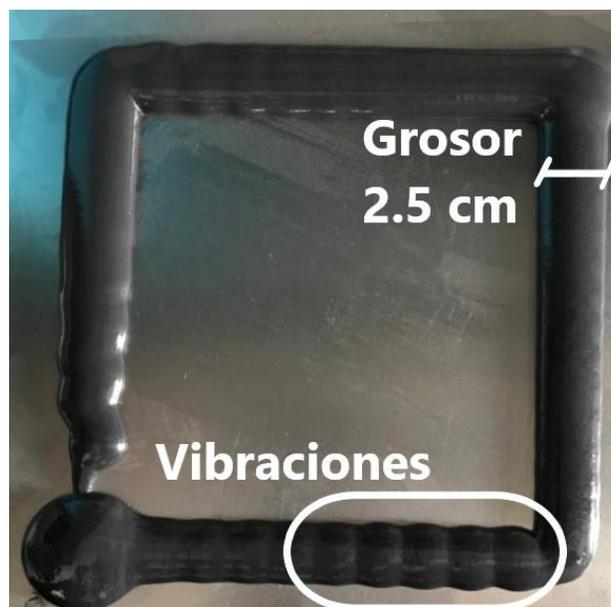
Este defecto se debe a que la velocidad de mezcla del cabezal es muy baja, lo cual ocasiona que la mezcla de ambos químicos genere pequeñas burbujas de aire en el poliuretano. Al colocar la mezcla en la plancha, las burbujas de aire revientan y el poliuretano queda con imperfecciones en su acabado final como se puede ver en la figura 55.



*Figura 55.* Imperfecciones en el acabado del poliuretano

**Problema 2: Vibraciones y grosor del empaque.**

El empaque resulta con pequeñas vibraciones al inicio de cada lado debido a la configuración de la aceleración de los ejes de movimiento. Además, el grosor es demasiado ancho debido a la velocidad de movimiento de la herramienta, adicionalmente se debe tomar en cuenta que la mezcla de poliuretano se expande a unos 2 milímetros a cada lado mientras se seca completamente.



*Figura 56.* Vibraciones y grosor del empaque

**Problema 3: Tramo inicial del diseño sin empaque.**

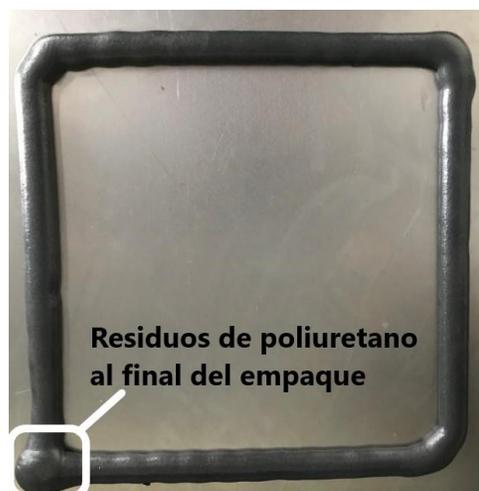
Este problema hace que el tramo inicial del diseño quede sin poliuretano debido al retraso que existe entre el encendido de las bombas de poliol e isocianato y el llenado del compartimento central del cabezal para la posterior expulsión de la mezcla de poliuretano por la boquilla.



*Figura 57.* Tramo inicial sin empaque

#### **Problema 4: Tramo final del empaque con residuos**

En las pruebas iniciales la activación del sistema neumático que cierra la boquilla del cabezal se realizó cuando el código G terminaba y por lo tanto el software Mach3 daba la orden de operación finalizada. Sin embargo, una cantidad de residuos de poliuretano se queda en la boquilla y al final caen por gravedad en la parte final del diseño generando una bola de poliuretano en el vértice inicial/final del empaque como se muestra en la figura 58.



*Figura 58.* Residuos de poliuretano al final del empaque

**Problema 5: Tiempos cortos de rutina de limpieza**

La comprobación de la rutina de limpieza se puede realizar por primera vez junto con las pruebas de fabricación de los empaques por lo que los tiempos definidos inicialmente resultaron insuficientes para limpiar de forma efectiva el cabezal de mezcla. La figura 59 muestra el resultado de la limpieza en la parte interna del compartimento central del cabezal de mezcla.



*Figura 59.* Residuos de poliuretano en el compartimento central de mezcla.

**5.2 Correcciones**

Las soluciones a los problemas encontrados en las pruebas iniciales de fabricación de empaques se describen a continuación:

**Problema 1: Consistencia y acabado de la mezcla de poliuretano.**

Este problema se soluciona aumentando la velocidad de mezcla del cabezal, esto mejora la calidad de la mezcla y su consistencia evitando la generación de burbujas de aire en el empaque. La velocidad de mezcla se modifica configurando el parámetro 1-00 del Drive que controla la

mezcla del cabezal. Una velocidad funcional para esta finalidad es de 75 Hz que resulta en una velocidad de giro de 297 rpm como se muestra en la figura 60.



**Figura 60.** Velocidad de mezcla del cabezal

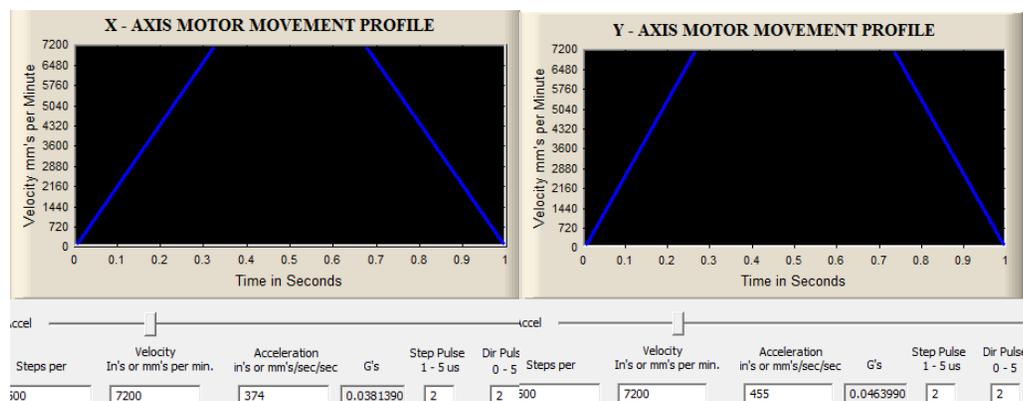
### **Problema 2: Vibraciones y grosor del empaque.**

Las vibraciones en la fabricación del empaque se reducen notoriamente tomando las siguientes medidas:

- Reducir la distancia entre la mesa de trabajo y la boquilla de la herramienta a 1 centímetro, para esto se debe modificar la ubicación de los topes para los sensores del límite en el eje Z lo cual permite bajar el cabezal hasta la posición deseada (figura 61).
- Aumentado los valores de aceleración de cada eje ( $X=374$  mm/s,  $Y=455$  mm/s) desde la configuración “Motor Tuning” del software Mach 3 (figura 62).



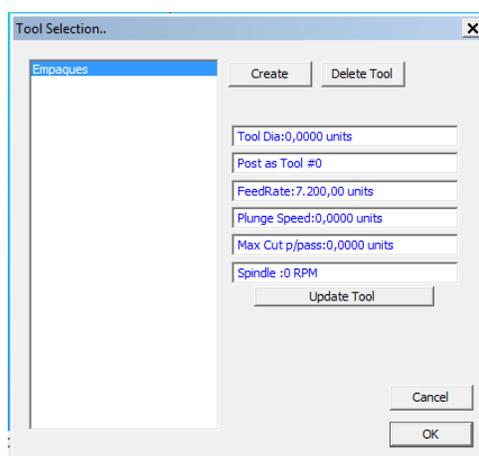
**Figura 61.** Ubicación de sensores límites de eje Z



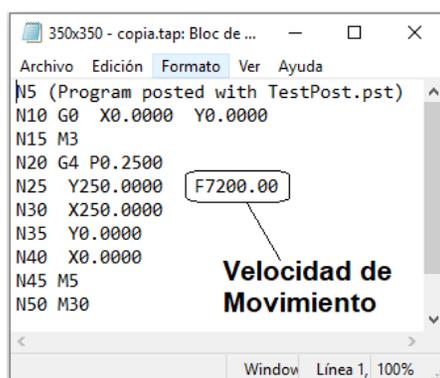
**Figura 62.** Velocidad máxima y aceleraciones de los ejes X e Y

Por otro lado, el grosor del empaque se puede controlar modificando la velocidad de movimiento de la herramienta al momento de fabricar el empaque, para esto se aumenta la velocidad máxima desde la configuración “Motor Tuning” del software Mach3 (figura 62).

Además, se debe configurar la velocidad de la herramienta para la generación del código G desde el software LazyCam en el apartado de “Tool Selection” (figura 63). La velocidad configurada en la herramienta se puede comprobar en el código G generado (figura 64).



**Figura 63.** Configuración de la velocidad de la herramienta en LazyCam



**Figura 64.** Velocidad de movimiento definida en código G

### **Problema 3: Tramo inicial del diseño sin empaque.**

Para solucionar este problema se toma las siguientes medidas:

- Agregar una subrutina de prueba de mezcla que se realiza una vez antes de proceder con la fabricación del empaque, esta subrutina activa desde la interfaz HMI (botón Test Mezcla). La subrutina enciende las bombas de polioli e isocianato y realiza la mezcla de los químicos, esto ayuda a llenar por primera vez el compartimiento central con la mezcla de poliuretano y permite verificar el funcionamiento del cilindro de cambio a modo trabajo. Esta subrutina se debe realizar en la posición Home de la maquina donde está ubicado el depósito de desechos.
- Agregar un retardo al inicio de la fabricación del empaque para dejar que las bombas de polioli e isocianato lleguen a su velocidad configurada. Esto evita que queden espacios sin poliuretano al inicio del empaque. Este retardo se puede configurar en el archivo de Post procesador del software LazyCam agregando el código (figura 65).

```

*****ChainStart*****
*****Rapid*****

[G{MODE}][ X{XPOS}][ Y{YPOS}] 'Now move to the X and Y pos that
[{{SPINDLEON}}] 'Turn on the spindle and if it is on don't put out the M3
G4 P0.2500 ➔ Código G4
Retardo de 250 ms
*****Line*****

[G{MODE}][ X{XPOS}][ Y{YPOS}] [ Z{ZPOS}] [ F{FEED}]

*****Arc*****

[G{MODE}][ X{XPOS}][ Y{YPOS}][ Z{ZPOS}] I{IPOS} J{JPOS}[ F{FEED}]

*****CanCycleStart*****

G{MODE} X{XPOS} Y{YPOS} Z{ZPOS} R{RAPIDHEIGHT} F{FEED}

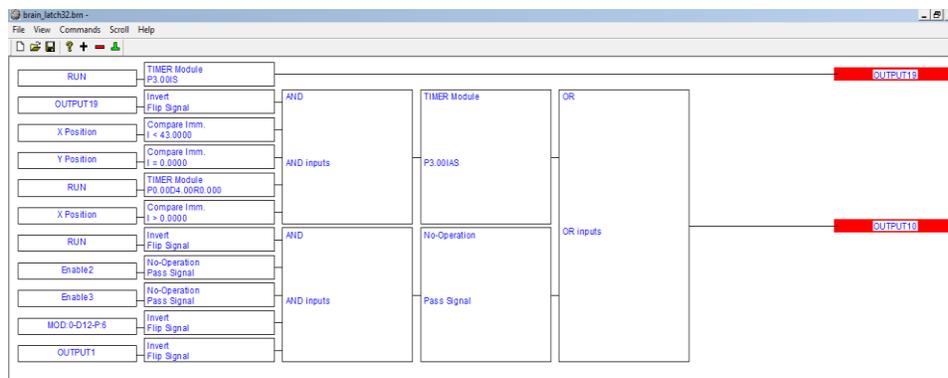
```

**Figura 65.** Retardo de 250 milisegundos en post procesador de LazyCam

#### Problema 4: Tramo final del empaque con residuos

Para evitar la caída de residuos desde la boquilla en la parte final del empaque se implementa una macro de programación en el software Mach3, esta macro es del tipo Brain (está ejecutándose constantemente) y permite apagar las bombas de poliol e isocianato, así como activar el mecanismo neumático que cierra la boquilla. Estas acciones se realizan unos momentos antes de finalizar el diseño del empaque. De esta forma se logra compensar la caída de residuos para completar la parte final del empaque.

La macro programada se muestra en la figura 66.

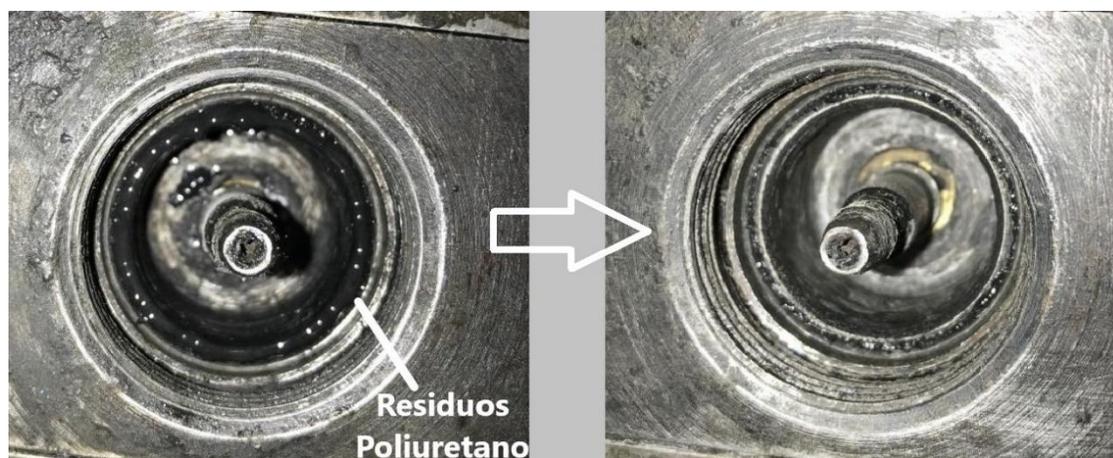


**Figura 66.** Macro para enviar la acumulación de residuos de empaque

### Problema 5: Tiempos cortos de rutina de limpieza

Para realizar una limpieza efectiva del cabezal de mezcla se realiza la siguiente rutina de limpieza con cada tiempo establecido. La diferencia entre la limpieza de las pruebas iniciales y la limpieza con los tiempos modificados se puede ver en la figura 67.

- Aire a presión por 4 segundos hacia el cabezal
- Dicloruro de metano por 1.5 segundos hacia el cabezal
- Aire a presión por 2 segundos hacia el bote de residuos, esto se realiza para liberar las mangueras del dicloruro de metano.
- Aire a presión por 8 segundos al cabezal para eliminar los restos de dicloruro.

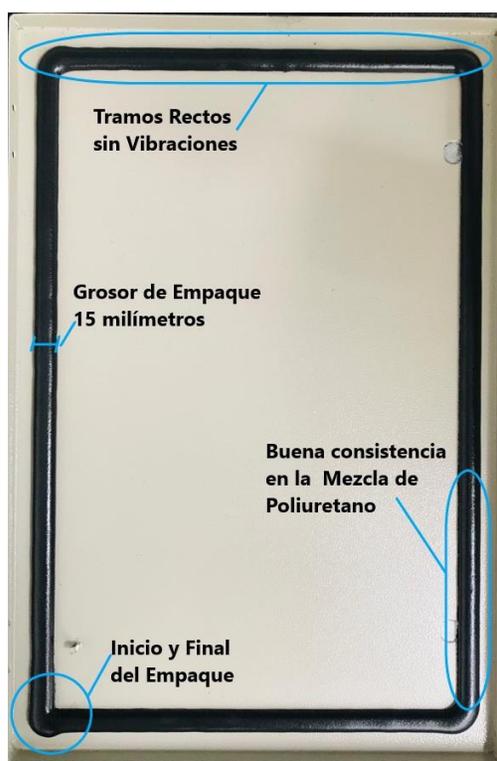


*Figura 67.* Diferencia entre rutinas de limpieza

### 5.3 Resultados finales

Una vez que se han solucionado los problemas encontrados en las pruebas iniciales, se puede fabricar los empaques de acuerdo con las dimensiones de los diseños requeridos para las puertas de los tableros eléctricos.

En las figuras 68 - 71 se observan los resultados finales de fabricación de los empaques de poliuretano.



*Figura 68.* Resultados del empaque final



*Figura 69.* Resultados de empaque en 12 tableros de control



**Figura 70.** Resultados del empaque en gabinete inoxidable



**Figura 71.** Empaque en puertas frontales, laterales y traseras de gabinete de distribución

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

- La máquina de empaques de poliuretano está diseñada para un uso continuo, sin embargo, la empresa Sical Ingeniería la utiliza puntualmente cuando existe fabricación de tableros eléctricos para sus clientes. Debido a esto se implementó una rutina diaria de recirculación de los químicos para evitar el taponamiento de las mangueras y su cambio constante, lo cual representaba pérdida de tiempo y capital por parte de la empresa.
- La rutina de limpieza automática después de la fabricación de empaques evita que queden residuos en los comportamientos de la herramienta, esto evita que restos de la mezcla de poliuretano se solidifiquen en el interior de los compartimientos y se generen obstrucciones al ingreso de los químicos polioli e isocianato.
- El nuevo sistema de control utiliza equipos genéricos como la tarjeta PCI para puerto paralelo de 40 pines, la tarjeta de control de movimiento y un relé inteligente de la marca WEG (empresa con la cual Sical Ingeniería trabaja en conjunto en diversos proyectos). Por lo tanto, la adquisición de equipos en caso de daño de los componentes resulta fácil y rápida a comparación del sistema anterior donde se tenía una tarjeta de control de movimiento diseñada por el fabricante.
- La documentación de respaldo que se generó como planos eléctricos, programación de relé inteligente, configuración de equipos y manuales de mantenimiento y operación de la máquina resulta importante para el entendimiento completo del modo de funcionamiento de la máquina

CNC de empaques, además de facilitar la implementación de futuras modificaciones o mejoras de la máquina al prescindir del soporte del fabricante original.

### **Recomendaciones**

- El químico dicloruro de metileno utilizado para la rutina de limpieza del cabezal de mezcla está restringido para su libre distribución debido a leyes de control de sustancias psicotrópicas, por lo tanto, la empresa Sical Ingeniería ha realizado el respectivo procedimiento para obtener los permisos de compra de este químico. La compra del químico se controla por la cantidad que se puede adquirir en un año y la empresa cuenta con un cupo inicial de 20 kilos, el cual vence en febrero de 2020. Por lo tanto, se recomienda a la empresa Sical Ingeniería realizar los trámites pertinentes para aumentar el cupo a 70 kilos basado en la producción actual.
- El uso constante de la máquina y el movimiento de la herramienta provoca que la soportería de la cinta transportadora del eje X se desvíe de su posición normal cada cierto tiempo causando que el empaque resulte desviado, por lo que en el manual de mantenimiento preventivo se recomienda su calibración mensual. Este problema se presenta principalmente porque el servomotor que controla el movimiento del eje Y es único y se encuentra por debajo de la mesa de trabajo en el lado izquierdo, este servomotor controla el movimiento mediante un sistema mecánico de cremallera y piñón, sin embargo, el otro lado de la mesa que sostiene la soportería se desplaza con deslizamiento a través de un riel. Por lo tanto, se recomienda realizar un trabajo futuro en la máquina para incluir un nuevo sistema de cremallera piñón al otro lado de la mesa de trabajo, igualmente controlado por su respectivo servomotor, de esta manera los dos servomotores deben trabajar de manera en sincronía para realizar el movimiento del eje Y, así evitar el desvío de la soportería del eje X.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bolívar, F. (2012). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*. Retrieved from Universidad Nacional Abierta y a Distancia: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/4883/Modulo%20Control%20Numerico%20Computarizado.pdf;jsessionid=D59D97CE2507AB07BCE54B25600384C0.jvm1?sequence=1>
- Cardozo, C. (2011). *Universidad Pontificia Bolivariana*. Retrieved from Universidad Pontificia Bolivariana: [http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital\\_21151.pdf](http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_21151.pdf)
- Díaz, F. (2008). *Programación automática de máquinas CNC*. México D.F.: Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán.  
*Entidad Colaboradora del Colegio de Arquitectos de Pichincha*. (2013, Enero). Retrieved from <https://www.ecp.ec/wp-content/uploads/2017/09/NECINSTALACIONESELECTROMECHANICAS2013.pdf>
- Gómez, M., & Muñoz, E. (2006). *Control numérico computarizado*. México D.F.: UAM-Azcapotzalco.
- Hurtado, A. (n.d.). Retrieved from EEYMUC: <https://www.eeymuc.co/31-protocolo-modbus/>
- Jimenez, R. (2003). *Universidad de Buenos Aires*. Retrieved from Universidad de Buenos Aires: <http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-control-numericopor-computadora.pdf>
- Kristjansson, E. (2009). *Automation.com*. Retrieved from <https://www.automation.com/pmd/MotionControlCardsforMachineDesign.pdf>
- Modbus Organization*. (2017). Retrieved from <http://www.modbus.org/>

*National Instruments*. (2019, Septiembre 17). Retrieved from <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>

*Universidad Nacional de Educación a Distancia*. (n.d.). Retrieved from Departamento de Ingeniería Eléctrica, Elextrónica y de Control: [http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion\\_de\\_referencia\\_2\\_ISE6\\_2\\_1.pdf](http://www.ieec.uned.es/investigacion/Dipseil/PAC/archivos/Informacion_de_referencia_2_ISE6_2_1.pdf)

*Universidad Nacional del Callao*. (2011). Retrieved from [https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes\\_Finales\\_Investigacion/Abril\\_2011/IF\\_LOAYZA\\_FIME/CAPITULO%20II.PDF](https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Abril_2011/IF_LOAYZA_FIME/CAPITULO%20II.PDF)

*Universidad Politécnica de Catalunya*. (n.d.). Retrieved from Universidad Politécnica de Catalunya: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3904/34017-14.pdf?sequence=14&isAllowed=y>

Ventura, V. (2014). *Polaridad.es*. Retrieved from <http://polaridad.es/que-es-g-code>

Weis, O. (2019, Octubre 21). *Guia de comunicación Modbus RTU*. Retrieved from Eltima: <https://www.virtual-serial-port.org/es/articles/modbus-rtu-guide/>

Weis, O. (2019, Noviembre 28). *Tutorial Avanzado Modbus ASCII*. Retrieved from Eltima: <https://www.virtual-serial-port.org/es/articles/modbus-ascii-guide/>

## **ANEXOS**

**A. Manual de usuario**

**B. Plan de mantenimiento preventivo**

**C. Planos eléctricos, neumáticos, hidráulicos y de control**