

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

Automatización de Estampadora de Masas para
la Industria Panadera

Autores:

- Cabrera, Dardo Alfredo
- Giorgetti, Juan Ignacio

Director:

- Ing. Armando Maxit

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos
para acceder al título de Ingeniero Electrónico*

en la

Facultad Regional Paraná

Fecha (Noviembre de 2017)

Declaración de autoría:

Nosotros declaramos que el Proyecto Final “Automatización de Estampadora de Masas para la Industria Panadera” y el trabajo realizado son propios. Declaramos:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:

- Dardo A. Cabrera
- Juan I. Giorgetti

Fecha: Noviembre de 2017

Agradecimientos:

Especial agradecimiento al Ing. Armando Maxit que aceptó nuestra propuesta de ser director de tesis y nos ayudó en todo el proceso, sobre todo en las primeras etapas del proceso.

A nuestras familias, que nos han apoyado a lo largo de todas nuestras vidas, enseñándonos que todo lo bueno llega con esfuerzo, honestidad y perseverancia.

A nuestros amigos y compañeros de facultad, por compartir momentos de alegría y tristeza, pero siempre trabajando codo a codo para salir adelante con todos los desafíos que esta carrera nos presentó.

A nuestras novias que han estado siempre a nuestro lado, festejando nuestros logros como si fueran propios y soportándonos en los momentos adversos para no dejarnos caer.

A todas las personas que de un modo u otro han hecho que lo que logramos en este día sea posible.

Cabrera, Dardo A.
Giorgetti, Juan I.

Universidad Tecnológica Nacional

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

Automatización de Estampadora de Masas para la Industria Panadera

Cabrera, Dardo A.

Giorgetti, Juan I.

Abstract:

With the aiming of automate the dough cutting machine ZU-E10, which works as 3 independent machines, a mathematic modelling was developed as well as a control logic using a HMI PLC to finally obtain a harmonic work between each other.

The system was developed using an Unitronics M90 PLC, as the main processor of the whole logic of the automatization system as well as a Human Machine Interface. There were also used 3 Schneider Altivar 12 variable speed drives with their correspondent trifasic motors for the transport, stretching and cutting of the dough. For the communication between the PLC and the drives it was used the RS-485 Modbus protocol implemented via UTP class 5.5 copper wires and RJ12/45 connectors.

It was achieved an automated machine with easy handling and setup with a user friendly interface, giving no margin of parameter input error on behalf of the baker/operator. The final product comes out of the dough cutting machine with the right thickness and its shape is perfect. There is virtually no waste of dough when the process is complete.

Keywords:

1. *Automated cookie cutter.*
2. *Easy handling.*
3. *Minimal waste.*

Resumen:

Con el fin de automatizar la estampadora ZU – E10, que trabajaba como 3 máquinas separadas, se realizó un modelado matemático y una lógica de control mediante un PLC con HMI para finalmente obtener un trabajo armonioso entre ellas.

El sistema fue desarrollado usando un PLC Unitronics M90, como el procesador central de toda la lógica del sistema de automatización así como una interfaz hombre máquina. Se usaron además 3 variadores de velocidad Altivar 12 de la marca Schneider con sus correspondientes motores trifásicos para el transporte, afinamiento y corte de la masa. Para la comunicación entre el PLC y los variadores se usó el protocolo de comunicación RS-485 Modbus implementado a través de cables UTP categoría 5.5 y conectores R12/45.

Se logró una maquina automatizada, con un uso y configuración sencillos y una interfaz amigable al usuario que no da margen de ingreso de parámetros erróneos por parte del panadero/operador. El producto final sale de la estampadora con el espesor correcto y la formas de este es perfecta. No hay prácticamente desperdicio de masa cuando el proceso está finalizado.

Palabras Clave:

1. *Cortador de masa automatizado.*
2. *Fácil manejo.*
3. *Desperdicio mínimo.*

Reconocimientos:

A nuestra querida facultad, Universidad Tecnológica Nacional - Regional Paraná, y a la calidad humana del personal docente y no docente.

A Industrias Zunino SRL y su personal, que siempre tuvo la mejor predisposición para prestarnos todos los elementos para hacer nuestras pruebas para la tesis.

Índice:

Introducción.....	1
Desarrollo.....	3
2.1 Descripción general de partes que componen la Estampadora	3
2.1.1 Cinta Transportadora.....	3
2.1.2 Laminadora.....	4
2.1.3 Cinta de Corte y Transportador de Bandejas (Estampadora).....	5
2.2 Descripción de elementos particulares y funcionamiento de los mismos	6
2.2.1 PLC y Panel de Control.....	6
2.2.2 Variador de Velocidad.....	7
2.2.3 Motor Trifásico.....	8
2.2.4 Motorreductor	9
2.2.5 Motor de continua y encoder	10
2.2.6 Rejilla de seguridad y soporte para moldes	12
2.3 Esquemático de los distintos elementos de la maquina	14
2.3.1 Esquemático de estampadora	14
2.3.2 Esquemático de laminadora y mesa alimentadora de masa	14
2.4 Implementación de los elementos de automatización	16
2.4.1 Estudio e implementación del protocolo de comunicaciones RS-485 “Modbus”	16
2.4.2 Marco teórico-práctico para la determinación del corte óptimo de masa	23
2.4.2.1 Desarrollo teórico para encontrar modelo matemático de la automatización.....	25
2.4.2.2 Pruebas para determinación de modelo matemático aproximado.....	31
2.4.2.3 Elección del modelo matemático más apto para implementación práctica.....	34
2.4.3 Diagrama de flujo del programa implementado en el PLC	36
2.5 Diseño Completo.....	39
Resultados	42
Análisis de Costos	45
Discusión y conclusiones	47
Bibliografía.....	48

Lista de Figuras:

Fig. 1 – Cinta Transportadora.....	3
Fig. 2 – Laminadora.....	4
Fig. 3 – Cinta de Corte y Transportador de Bandejas.....	5
Fig. 4 – PLC y Panel de Control.....	6
Fig. 5 – Vista general del programa U90 Ladder para programación del PLC.....	7
Fig. 6 – Variador de Velocidad “Schneider – Altivar 12”.....	8
Fig. 7 – Tipo de motor usado en las maquinas.....	9
Fig. 8 – Motorreductor adosado a motor y engranajes con cadena de transmisión.....	10
Fig. 9 – Motor de CD para graduación de velocidad de cinta de corte.....	11
Fig. 10 – Encoder utilizado en cinta de corte.....	11
Fig. 11 – Rejilla de seguridad y soporte para moldes.....	12
Fig. 12 – Moldes de corte y sus diversas formas.....	13
Fig. 13 – Esquemático estampadora y conexión con cinta transportadora y laminadora.....	14
Fig. 14 – Esquemático laminadora y cinta transportadora y conexión con estampadora.....	15
Fig. 15 – Esquema red RS-485 “Modbus”.....	16
Fig. 16 – Implementación del bus “Modbus” en la maquina.....	17
Fig. 17 – Red Ladder para configuración del PLC como maestro “Modbus”.....	18
Fig. 18 – Estructura del menú de comunicaciones de variador Altivar 12 de “Schneider Electric”.....	19
Fig. 19 – Descripción de los parámetros de comunicaciones.....	20
Fig. 20 – Ejemplo de escritura de un registro del variador por parte del PLC mediante “Modbus”.....	21
Fig. 21 – Bosquejo de distintos tipos de corte según configuración de velocidad de los variadores.....	23
Fig. 22 – Bosquejo de las distintas velocidades de los motores en las 3 maquinas.....	25
Fig. 23 – Bosquejo de la relación entre espesor inicial y final de la masa al pasar por laminadora.....	28
Fig. 24 – Diagrama de flujo de datos del programa en el PLC.....	38
Fig. 25 – Foto de laminadora con automatización incorporada.....	39
Fig. 26 – Pantalla Inicial del PLC.....	39
Fig. 27 – Pantalla de calibración de moldes y espesores de masa.....	40
Fig. 28 – Pantalla para mostrar motores apagados o manual.....	40
Fig. 29 – Imagen de masa cortada por moldes de 60 mm.....	43
Fig. 30 – Imagen de masa cortada por moldes de 80 mm.....	43
Fig. 31 – Incorporación de sensor inductivo para corte de máquina, en rejilla de seguridad.....	44
Fig. 32 – Folleto comercial de estampadora sin automatizar.....	44

Lista de Tablas:

Tabla 1 – Prueba 1 de velocidades con relación de espesor de 3.3:1.....	31
Tabla 2 – Prueba 1 de velocidades con relación de espesor de 2:1	31
Tabla 3 – Prueba 2 de velocidades con relación de espesor de 3:1	32
Tabla 4 – Prueba 2 de velocidades con relación de espesor de 2:1	32
Tabla 5 – Prueba 3 de velocidades con relación de espesor de 2:1	33
Tabla 6 – Prueba 1 de velocidades con relación de espesor de 1:1	33
Tabla 7 – Valores de “esp” en relación a los espesores finales e iniciales de masa.....	33
Tabla 8 – Costo total de automatización para una unidad.....	45
Tabla 9 – Costo total de automatización para lote de 50 unidades	45

Lista de Ecuaciones:

Ecuación 1 – Recorrido de lona (contado por encoder).....	24
Ecuación 2 – Relación entre las velocidades de estampadora y laminadora.....	25
Ecuación 3 – Relación entre velocidad tangencial y angular de los rolos	26
Ecuación 4 – Tiempo de avance de lona	26
Ecuación 5 – Relación de reducción por tren de poleas.....	26
Ecuación 6 – Reducción en el motor 1.....	27
Ecuación 7 – Reducción en el motor 2.....	27
Ecuación 8 – Velocidad angular de un motor	28
Ecuación 9 – Frecuencia de la laminadora.....	28
Ecuación 10 – Vel. de laminadora en base a la de la cinta transportadora y relación de espesores ..	29
Ecuación 11 – Ecuación 10 en base a velocidades angulares y radios de los rolos.....	29
Ecuación 12 – Relación de reducción final en cinta transportadora.....	29
Ecuación 13 – Frecuencia del motor de la cinta transportadora.....	30
Ecuación 14 – Aproximación lineal para determinación de variable “esp” en base a espesores lineales y finales.....	34
Ecuación 15 – Aproximación cuadrática para determinación de variable “esp” en base a espesores lineales y finales.....	34
Ecuación 16 – Aproximación exponencial para determinación de variable “esp” en base a espesores lineales y finales.....	35
Ecuación 17 – Frecuencia de cinta transportadora utilizando modelo cuadrático de aproximación.	35

Lista de Abreviaciones

Abreviatura	Significado
Fig.	Figura
mm	Milímetros
cm	Centímetros
V	Volts
Hz	Hertz
HP	Horse Power
mA	mili Ampere
RPM	Revoluciones por Minuto
CD	Corriente Directa
PPR	Pulsos por Revolución
s	Segundos
ms	Milisegundos
kbps	Kilo Baudios por Segundo
U	Unidad

Dedicado a:

A nuestros seres queridos que siempre están presentes en los momentos adversos y siempre dispuestos a compartir de esos inolvidables momentos hermosos que nos brinda la vida y a todos aquellos que aunque físicamente no estén más, sus presencias siguen vivas en nuestros corazones y nos impulsan a ser mejores profesionales y sobre todo mejores personas.

Introducción

La elección de este proyecto se deriva de una necesidad visualizada dentro de la empresa Industrias Zunino SRL de automatizar una máquina, que si bien ya estaba en funcionamiento, tenía serias deficiencias en lo que es el corte eficiente de la masa para galletitas.

Esta máquina, no contaba con automatización alguna y todos los ajustes de velocidad de las distintas etapas (alimentación de la masa a los rolos, velocidad de los mismos para alisar la masa, corte de la misma y transporte de las galletitas ya cortadas) debían hacerse a “ojo” por parte del panadero, lo que provocaba un corte desperejo de las galletitas y/o estiramiento/acumulación de masa en los rolos.

La automatización hecha en este trabajo además presenta varias mejoras significativas en lo que respecta a la versión de esta sin automatización alguna. Estas son:

- PLC con HMI para más fácil manejo por parte del panadero.
- Sensor de seguridad para el cese de funcionamiento al abrir la reja donde están alojados los moldes.
- Mejora a la parada de emergencia para que corte toda la maquinaria, no solo los motores.
- Lectura en todo momento de valores de velocidades de los motores y el diámetro actual de los moldes y mostrado en el PLC.
- Mejoras en la introducción de los parámetros en el PLC con detección y corrección de errores en él.

Es destacable mencionar que todo esto ha sido realizado con los mismos elementos que eran utilizados previamente en el sistema no automatizado y que fue el ingenio de los integrantes que logró con elementos de prestaciones limitadas lograr un resultado más que óptimo. El PLC usado, fue pensado previamente para funcionalidades muy básicas y acotadas y por ello no contaba con HMI. Lo reemplazamos por un PLC barato, también de prestaciones básicas, pero con esta interfaz integrada para un manejo más sencillo. Fue uno de los mayores desafíos realizar una lógica tan precisa con dichas limitaciones. Se le agregó además a todo el sistema de automatizado, cables UTP categoría 5.5 y conectores RJ12 y RJ45 para el conexionado de los variadores con el PLC mediante el protocolo RS-485 Modbus y una roseta con un derivador de señal o “splitter” para la creación del bus.

El objetivo comercial en este caso se planteó para Industrias Zunino SRL, pero al ser una máquina que pueda ser utilizada en la industria panadera, excede a nuestro objetivo y se puede extender a todos tipos de negocios que incluyan la panificación como parte de su ciclo económico, por ejemplo: panaderías industriales o tipo PYME, supermercados que tengan elaboración de panificación, entre otros.

Se trató de hacer un sistema eficiente, y que no sea excesivamente costoso para que su alcance sea mayor al público mencionado en el párrafo anterior.

Hoy en día en el mercado hay un gran número de empresas dedicadas a la panificación y elaboración de galletitas y masas finas.

Sin embargo, la investigación que hemos llevado a cabo acerca de algún sistema de automatización de este tipo en las industrias y panaderías de Paraná nos arrojó que el emprendimiento que llevaríamos a cabo junto a Industrias Zunino SRL sería el primero en la ciudad (esto es, el proceso totalmente automatizado, dado que hay procesos semiautomatizados que aún cuentan con intervención humana).

El ciclo de vida de este tipo de producto es muy grande, puesto que los procesos de elaboración de galletitas y masas no han cambiado mucho con el paso de los años y las modificaciones que se implementarían para la automatización no cambiarían el producto, sino más bien el proceso de creación del mismo. Y como el panadero, como cualquier operario, es bastante reacio al cambio y una vez que pase el proceso de acostumbramiento a la “nueva” estampadora, va a ver facilitado su labor y creemos que va a apreciar su utilidad por muchos años.

Estimamos que este sistema automatizado de corte de masas va a tener una vida útil de mínimo 15 años, siempre y cuando teniendo en cuenta que sigan existiendo en el mercado los elementos usados para la implementación de dicho sistema en el caso de una eventual avería o rotura total por cualquier motivo de alguno de los componentes usados en la estampadora.

Desarrollo

Comenzaremos describiendo las partes de una estampadora de masas, modelo ZU-E10 propiedad de Industrias Zunino SRL, y su funcionamiento para luego enfocarnos de lleno al desarrollo propio del proyecto. Para poder visualizar de qué estampadora se está hablando, analizaremos las dimensiones y partes de la misma para poder entender qué máquina estamos automatizando.

2.1 Descripción general de partes que componen la Estampadora

2.1.1 Cinta Transportadora

En la Fig. 1 se puede observar la cinta transportadora que lleva la masa para alimentar a los rolos (laminadora) que le darán el espesor final deseado a la misma.



Fig. 1 – Cinta Transportadora

Sus dimensiones son:

- Alto: 110 cm.
- Largo: 180 cm.
- Ancho: 53 cm.

2.1.2 Laminadora

La Fig. 2 nos muestra la laminadora que cuenta con 2 rolos de acero que, con un graduador se puede elegir desde un espesor de 1.5 mm hasta 15 mm y gracias a un motor trifásico (con su correspondiente variador) giran y afinan la masa al espesor deseado.



Fig. 2 – Laminadora

Sus dimensiones son:

- Alto: 35 cm.
- Largo: 23 cm.
- Ancho: 81 cm.

2.1.3 Cinta de Corte y Transportador de Bandejas (Estampadora)

En la Fig. 3 se observa la cinta de corte que transporta la masa con el espesor final hacia los moldes de corte que le dan la forma final de galletita deseada. Luego se divide en 2 partes: la felpa que extrae los restos de masa no utilizados y la estibadora que lleva las galletitas ya cortadas a las bandejas que son transportadas por 2 bandas rugosas que van por debajo de la cinta de corte.

Todo este sistema está comandado por el PLC que se ve en la figura, el encargado de toda la lógica de automatización.



Fig. 3 – Cinta de Corte y Transportador de Bandejas

Sus dimensiones son:

- Alto: 95 cm.
- Largo: 190 cm.
- Ancho: 81 cm.

2.2 Descripción de elementos particulares y funcionamiento de los mismos

2.2.1 PLC y Panel de Control

En la Fig. 4 se puede observar el panel de control que aloja al PLC, un potenciómetro que controla la velocidad de la cinta de corte y los botones de inicio y parada de la estampadora.



Fig. 4 – PLC y Panel de Control

El PLC, que es el cerebro de la operación de automatización, es de la marca Israelita “Unitronics”. El modelo en cuestión es el M91-2-R1 que cuenta con HMI incorporado y los protocolos de comunicaciones serie:

- “RS-232”: para programación/depuración del mismo, así como comunicación punto a punto con otro dispositivo
- “RS-485”: para control en red Modbus, pudiendo funcionar como Maestro (nuestro caso) o como esclavo.

Cuenta además con una entrada analógica (comandada por tensión o por corriente), 10 entradas y 6 salidas digitales.

Podemos ver en la Fig. 4 el panel de control con el PLC inserto.

Este se programa en lenguaje ladder principalmente y trae una suite de programación y depuración llamada “U90 Ladder”.

A continuación, se presenta una vista general con una configuración básica del mismo para que actúe como maestro en una red Modbus RS-485.

Cuenta con registros tipo entero de 16 bits (de memoria y de sistema), temporizadores, datos tipo bit (de memoria y de sistema) y manejo de entradas y salidas. Aquí se puede

configurar además que la entrada analógica trabaje por tensión o por corriente, siempre y cuando se configuren los jumpers correctos en la placa del PLC.

Tiene muchas otras funcionalidades que para este informe no vienen al caso.

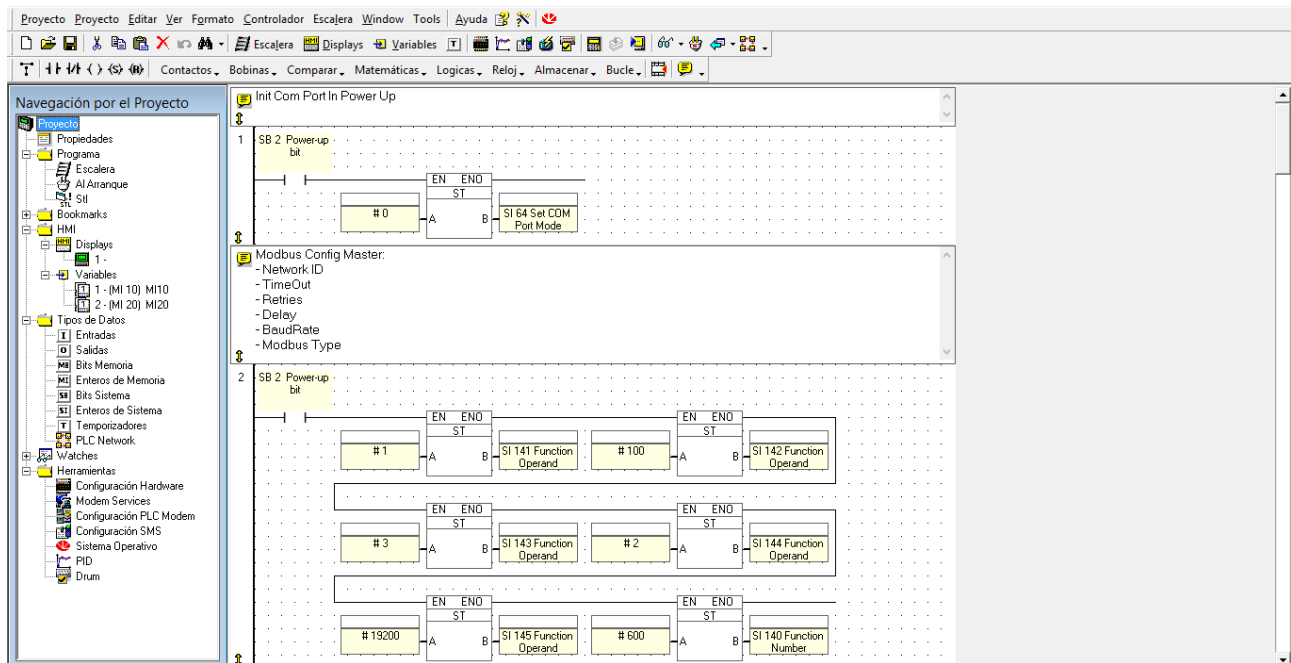


Fig. 5 – Vista general del programa U90 Ladder para programación del PLC

2.2.2 Variador de Velocidad

Estos son de la compañía “Schneider Electric” y el modelo que se usa en todas las máquinas es el “Altivar 12”.

Estos reciben una tensión monofásica de 220 V y la transforman a una trifásica de 380 V.

Este tiene distintos tipos de arranques, se puede variar la velocidad por Hertz o RPM, a través de una perilla central, donde también se configuran todas las demás funcionalidades. Este variador además acepta un frenado suave y uno de emergencia inyectándole corriente inversa.

Tiene 1 entrada y 1 salida analógicas y 4 entradas digitales. La entrada analógica nos permite insertar un potenciómetro para el control manual de los variadores y las digitales sirven para diversas utilidades (en nuestro caso nos determinan el paso de un modo de manejo a otro como se verá más adelante en el apartado de software).

El protocolo de comunicaciones que manejan estos variadores es RS-485 “Modbus” en modo esclavo únicamente. Se aceptan hasta un máximo de 247 variadores en el bus.

En la Fig. 6 se puede observar el mismo con sus respectivas entradas y la salida trifásica, así como las teclas de run, stop, modo, escape y la perilla principal en el centro de este.



Fig. 6 – Variador de Velocidad “Schneider – Altivar 12”

2.2.3 Motor Trifásico

Estos manejan todos los desplazamientos de las distintas cintas (corte y transportadora), así como el giro de los rolos metálicos de la laminadora y la subida y bajada de los moldes de corte.

Estos son de la marca “MEC SA”. Son alimentados a través de los variadores que hacen la conversión de tensión monofásica a trifásica y la conexión es del tipo triángulo. Las frecuencias nominales de trabajo oscilan desde los 15 Hz a los 90 Hz y esos son los valores a los que los hicimos trabajar en el proyecto.

El sistema usa un motor de $\frac{1}{4}$ HP para la cinta transportadora y uno de $\frac{3}{4}$ HP para la laminadora y $\frac{1}{2}$ HP para la estampadora.

En la Fig. 7 se puede observar uno de los motores usados para las pruebas de tesis que son los mismos que están insertos en la máquina.



Fig. 7 – Tipo de motor usado en las maquinas

2.2.4 Motorreductor

Este es el encargado de llevar la velocidad del motor en la cinta transportadora a una más adecuada para que la cinta alimente correctamente a la laminadora.

Este Motorreductor es producido por la compañía “Transpower SRL”. Pertenece a la línea NMTR y trabaja con relaciones de transformación desde 1:7.5 a 1:100.

En la cinta transportadora es usada con una relación 1:60 mientras que en la laminadora se usa una relación de 1:100. Además de la reducción correspondiente a cada motorreductor existe una reducción en la cinta transportadora con engranajes de 9 dientes a 20 dejándonos una reducción final de 3:400 y la estampadora tiene solo reducción a correas de 1:30.

Estas relaciones son importantes tenerlas en cuenta ya que es uno de los factores que determina la forma de la ecuación de modelado de todo el sistema para implementarlo en el programa ladder.

En la Fig. 8 se puede observar el motor de la cinta transportadora y adosado a este, el motorreductor con una cadena solidaria a los 2 engranajes mencionados anteriormente.



Fig. 8 – Motorreductor adosado a motor y engranajes con cadena de transmisión

2.2.5 Motor de continua y encoder

El motor de continua es el que tiene la tarea de llevar a cabo la calibración de la cinta de corte para ajustarse a los distintos diámetros de los moldes.

Las características técnicas de este motor son: 12V de tensión y 530 mA de corriente (valores nominales) y 170 RPM de velocidad nominal. El eje de salida es de 10 mm de diámetro y cuando este gira, acciona una pequeña cadena que hace mover el brazo del criquet, que es el encargado del movimiento de la cinta para que no sea un movimiento continuo de la misma sino más bien, de movimiento y parada para corte de masa y seguir el proceso. Se tiene una escala para saber visualmente el diámetro del molde actual.

En la Fig. 9 podemos observar el motor de continua unido al brazo del criquet mediante una cadena y la cinta de graduación, y el escéntrico en la esquina inferior izquierda, que se encarga de la subida y bajada de los moldes de corte.



Fig. 9 – Motor de CD para graduación de velocidad de cinta de corte

Este motor trabaja en conjunto con un encoder o codificador de cuadrante que manda un tren de pulsos cuando gira el eje del motor, permitiendo así que el PLC pueda saber la velocidad real a la que está girando el eje y cuántas vueltas da. El encoder está formado por dos sensores de efecto hall que proporcionan un total de 360 pulsos por cada vuelta completa del rotor (PPR). Es el PLC que junto con la lógica programada y lo que lee del encoder determina cuánto tiene que girar el motor para la calibración del molde.

Como son 2 hilos del encoder que se conectan al PLC, en realidad serán 720 PPR los que cuente este por vuelta.

En la Fig. 10 se observa el encoder usado en la cinta de corte (escondido a la vista del operario).



Fig. 10 – Encoder utilizado en cinta de corte

2.2.6 Rejilla de seguridad y soporte para moldes

Esta rejilla previene al panadero u operario que esté manejando la máquina de algún accidente con los moldes (que tienen filo para el corte de la masa) dado que tiene un sensor inductivo (se le agregó en el presente proyecto) en uno de los vértices de esta y que al abrirla avisa al PLC y éste detiene la marcha de toda la máquina y permite el cambio de los moldes.

Estos están soportados por una barra metálica que cruza todo el ancho de la cinta de corte y que junto a unos bulones y unas tuercas mariposa sujetan al mismo para que no haya nada suelto.

En la Fig. 11 observamos la rejilla de seguridad con el soporte para los moldes con un juego de ellos ajustado al mismo.



Fig. 11 – Rejilla de seguridad y soporte para moldes

En la Fig. 12 podemos ver distintos tipos de moldes usados en la elaboración de galletitas con diversas formas.



Fig. 12 – Moldes de corte y sus diversas formas

2.3 Esquemático de los distintos elementos de la maquina

2.3.1 Esquemático de estampadora

En la Fig. 13 podemos observar el conexionado de la cinta de corte con su motor trifásico y correspondiente variador, el PLC y su fuente, el motor de CD junto a su encoder y puente H, los contactores que conectan la entrada de tensión a toda la estampadora, los botones de marcha y parada, así como el de parada de emergencia.

Se le han agregado además los conectores tipo RJ12 al PLC y RJ45 al variador, correspondiente a la implementación de automatización que hemos desarrollado en el presente proyecto.

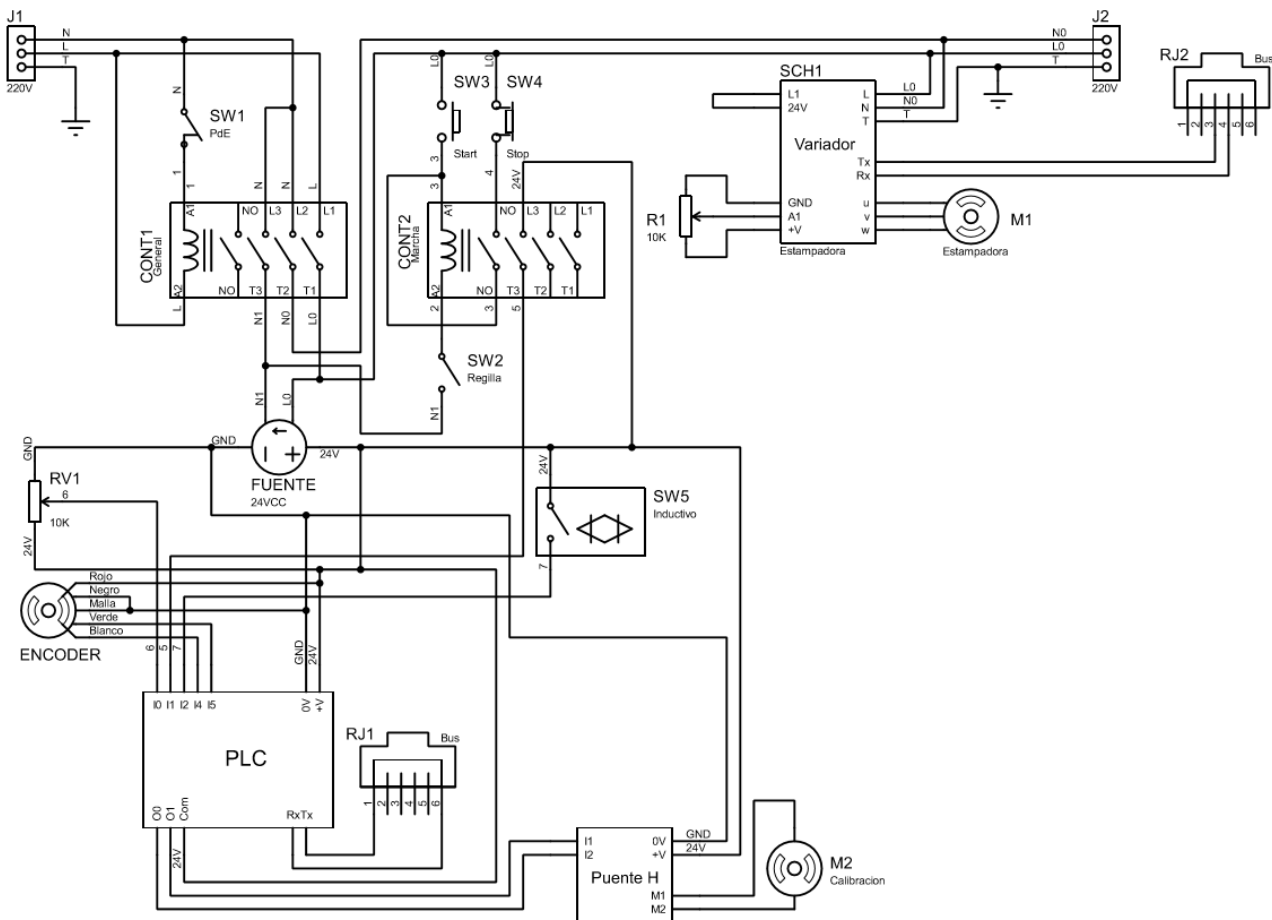


Fig. 13 – Esquemático estampadora y conexión con cinta transportadora y laminadora

2.3.2 Esquemático de laminadora y mesa alimentadora de masa

En la Fig. 14 podemos observar el conexionado de la laminadora y la cinta transportadora que cuentan solo con un motor y su variador, un potenciómetro para regulación manual de este y la alimentación que viene desde la estampadora.

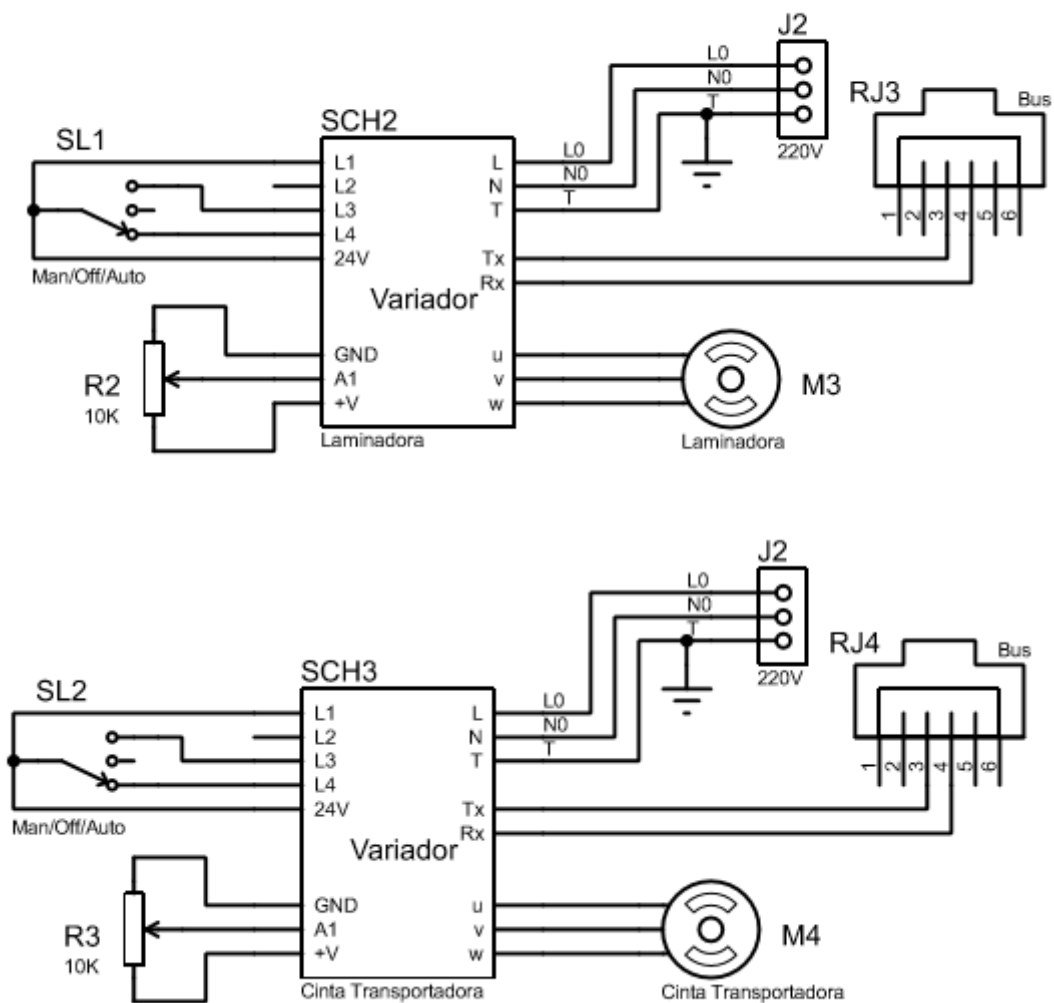


Fig. 14 – Esquemático laminadora y cinta transportadora y conexión con estampadora

Se han agregado, además, los conectores RJ45 que son los que conectan los variadores al bus "Modbus" implementado en la automatización del sistema.

2.4 Implementación de los elementos de automatización

2.4.1 Estudio e implementación del protocolo de comunicaciones RS-485 “Modbus”

Para realizar la automatización de las 3 máquinas separadas para que trabajen como un todo es necesario que puedan comunicarse entre ellas de una forma que todo el tiempo estén sincronizadas y el elemento de control, el PLC en nuestro caso, pueda tomar las decisiones necesarias para configuración y corrección de parámetros según vaya recibiendo información de los elementos actuadores.

Como se mencionó previamente, esta comunicación se realiza a través del protocolo de comunicación serie RS-485 “Modbus” dado que es el único que manejan tanto el PLC como los variadores de velocidad. Este protocolo es del tipo punto-multipunto (diferiendo del RS-232 que es punto a punto). Esto significa que hay un elemento llamado maestro, que es el encargado de realizar todas las operaciones de lectura y escritura de datos y/o configuraciones sobre otro elemento, denominado esclavo, que solo tiene la capacidad de responder a estos pedidos por parte del maestro. Un esclavo jamás puede iniciar un pedido de lectura y/o escritura en la red “Modbus”.

Es punto a multipunto dado que solo puede haber un maestro, pero múltiples esclavos. Para nuestro caso serán 1 maestro y 3 esclavos, pero puede extenderse hasta 247 de estos.

La conexión entre ellos se realiza mediante un bus de comunicaciones que consta de un par de hilos trenzados para evitar las interferencias electromagnéticas y unas resistencias de terminación al inicio y final del bus. El cable usado, es del tipo UTP categoría 5.5 que cumple con los requisitos de impedancia propuestos por el protocolo. Este tipo de comunicación es Half-dúplex, esto es, solo hay una sola dirección de comunicación a la vez. Existe un bus a 4 hilos que permite la comunicación Full-dúplex, comunicación a dos vías, pero que no tiene implementación en este sistema ya que no lo admiten ni el PLC ni los variadores.

En la Fig. 15 se puede observar un esquema simple de cómo se arma una red RS-485 “Modbus”.

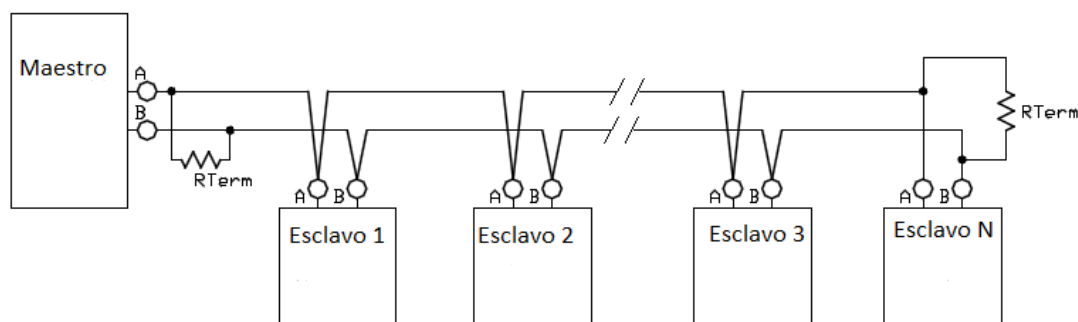


Fig. 15 – Esquema red RS-485 “Modbus”

Siguiendo este esquema eléctrico es como hemos armado el nuestro para la implementación del presente proyecto.

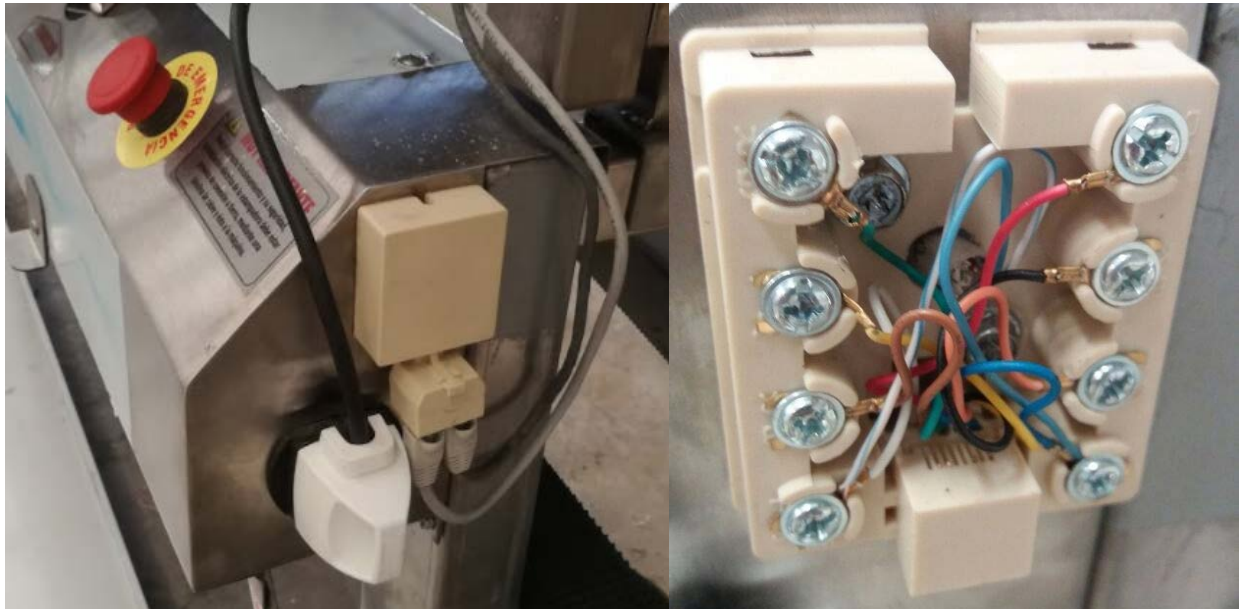


Fig. 16 – Implementación del bus "Modbus" en la maquina

Vemos en la Fig. 16 como insertamos una roseta de comunicaciones y un derivador o "splitter" para la creación del bus. Como se ve en la parte de la derecha, un cable UTP sobresale desde la mitad de la roseta. Este proviene del PLC, con una derivación para la estampadora, siendo el derivador el que le provee conexión al bus a la cinta transportadora y la laminadora.

Para la conexión lógica, a cada esclavo se le asigna un número de identificación para que solo responda a las peticiones del maestro que llame con ese número.

Las distintas pruebas hechas durante el estudio de este protocolo, nos han arrojado que la comunicación más efectiva se realizó con las siguientes configuraciones:

- Tasa de datos: 19200 Baudios/s.
- Longitud del dato: 8 bits.
- Paridad: sin paridad con un bit de stop.
- Tiempo máximo de espera: 15 s.

Si bien el protocolo admite un número muy grande de funciones variadas, las que admiten los variadores son la de lectura y escritura de registros (funciones 03 y 04 del protocolo respectivamente).

En la Fig. 17 vemos la configuración en el lenguaje Ladder del PLC para que trabaje en modo RS-485 “Modbus” y la explicación de la misma.

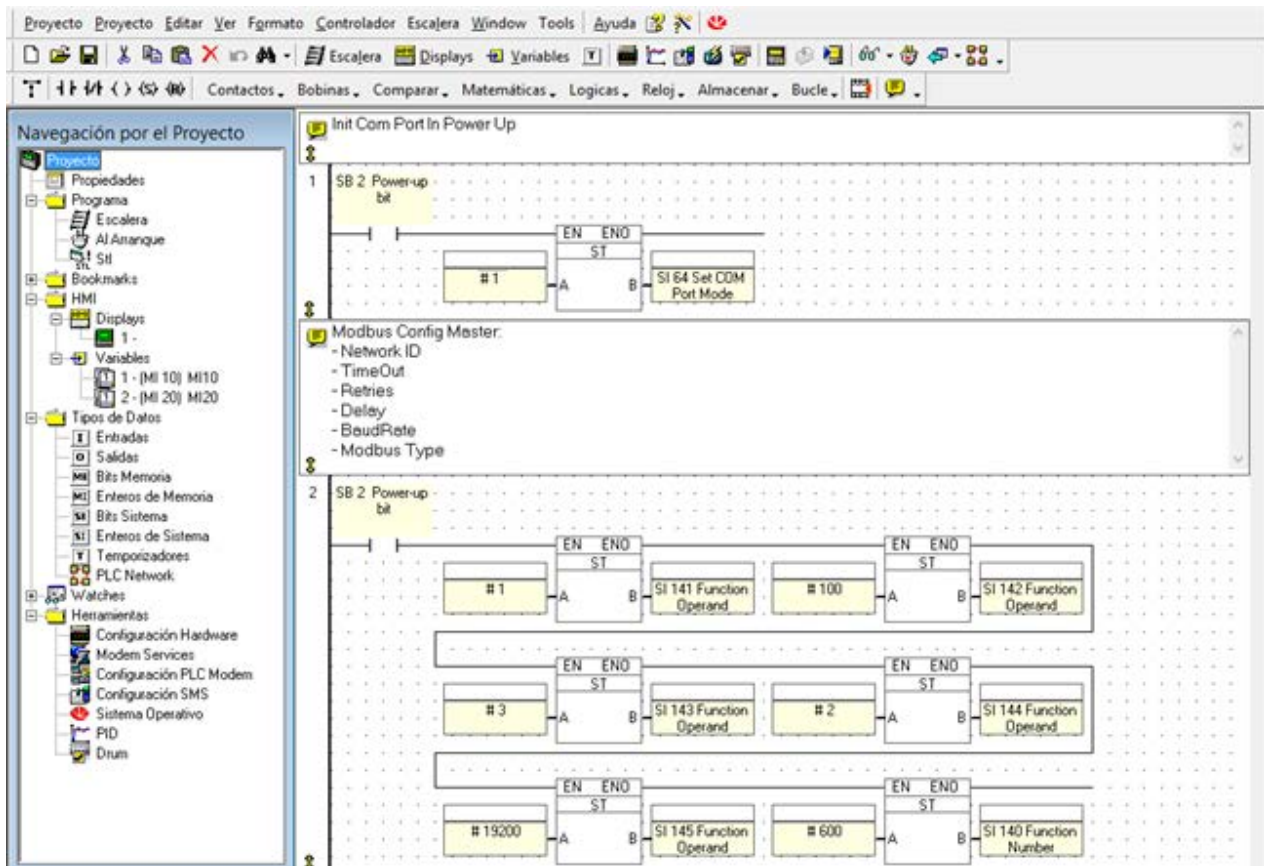


Fig. 17 – Red Ladder para configuración del PLC como maestro “Modbus”

Para la configuración de las distintas funciones del PLC, este modelo usa ciertos registros especiales llamados SI (enteros de sistema), que dependiendo el valor que se le ingresa al mismo, le corresponden distintas funciones (matemáticas, de comunicaciones, envío de SMS, entre otros).

Primeramente, debemos configurar el puerto de salida como RS-485, ya que puede trabajar tanto en RS-232 como RS-485. Esto se logra mediante la introducción del valor 1 en el registro especial SI 64 (un valor de 0 lo configuraría en el otro modo). Esto configura al bit de sistema 2 (SB 2), que es un bit de configuración inicial al encenderse el PLC.

Como segundo paso se inicializa el tipo de comunicaciones (“Modbus”) mediante la inserción de determinados valores constantes en determinados registros especiales SI que luego se pasa al SB 2 como configuración inicial para evitar que en cada barrido del PLC se vuelvan a configurar los parámetros previamente establecidos. Los registros usados y sus valores son:

- SI 140 (#600): Establece la comunicación como “Modbus”.
- SI 145 (#19200): Especifica la tasa de transferencia en baudios/s.

- SI 144 (#2): Indica el máximo intervalo de tiempo permitido entre 2 mensajes (en ms).
- SI 143 (#3): Cantidad máxima de reintentos luego de falla de entrega de trama.
- SI 142 (#100): Tiempo máximo de espera de respuesta por parte del maestro hacia el esclavo (en ms).
- SI 141 (#1): Identificador de dispositivo en la red “Modbus”.

Para la configuración de los variadores seguimos los pasos que nos proveyó el manual de usuario de los mismos y nos encontramos con el siguiente esquema que se puede apreciar en la Fig.18

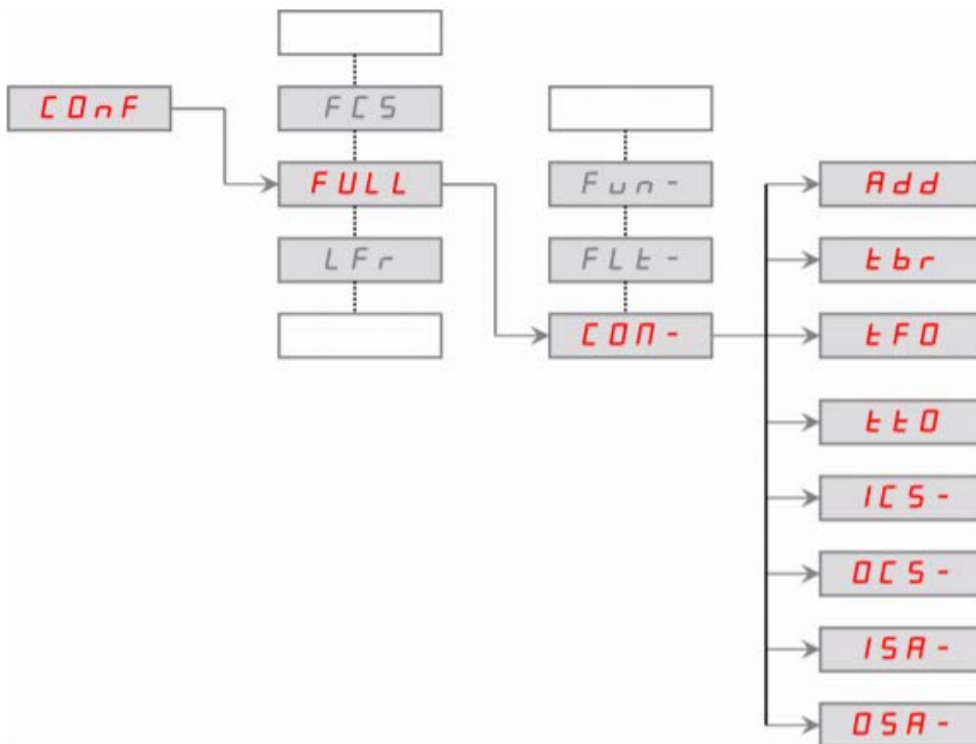


Fig. 18 – Estructura del menú de comunicaciones de variador Altivar 12 de “Schneider Electric”

Parameter description	Range or listed values	default	Possible Value	Modbus address
MODBUS address of the drive Add	1 to 247 0 : OFF (broadcast only)	OFF	OFF 1 . . . 247	16#1771 = 06001
MODBUS baud rate tbr	4,8 kbps 9,6 kbps 19,2 kbps 38.4 kbps	19,2 kbps	4. 8 9. 6 19. 2 38. 4	16#1773 = 06003
MODBUS format tfo	8O1: 8 bits, odd parity, 1 stop bit. 8E1: 8 bits, even parity, 1 stop bit. 8N1, 8 bits, no parity, 1 stop bit 8N2: 8 bits, no parity, 2 stop bits.	8E1	8 o 1 8 E 1 8 n 1 8 n 2	16#1774 = 06004
MODBUS Time out tto	Adjustable from 0.1 to 30s	10,0 s	0. 1 30	16#1775 = 06005
ICS -	Communication scanner submenus :Detailed in the next chapter			
DCS -				
ISA -				
OSA -				

Fig. 19 – Descripción de los parámetros de comunicaciones

Como se ve en la Fig. 18, las comunicaciones “Modbus” se configuran en cada variador siguiendo la estructura de menús anidados, accesibles a todos ellos mediante la perilla central.

En tanto que en la Fig. 19 observamos la descripción de cada parámetro, sus posibles valores y los que están configurados por defecto. De todos ellos solo usamos los primeros 4:

- Add: dirección de esclavo.
- Tbr: tasa de transmisión (en kbps).
- Tfo: formato de trama (cantidad de bits en palabra, paridad y cantidad de bits de stop).
- Tto: tiempo máximo de espera (en s).

Finalmente, pasaremos a explicar cómo se implementan en el PLC, las funciones de lectura y escritura de registros “Modbus” (este modelo posee otras funciones que no son tenidas en cuenta ya que los variadores solo trabajan con las funciones nombradas previamente).

Para este apartado, mostraremos en la Fig. 20 como se configura una red Ladder para enviar una trama “Modbus” de escritura de registro.

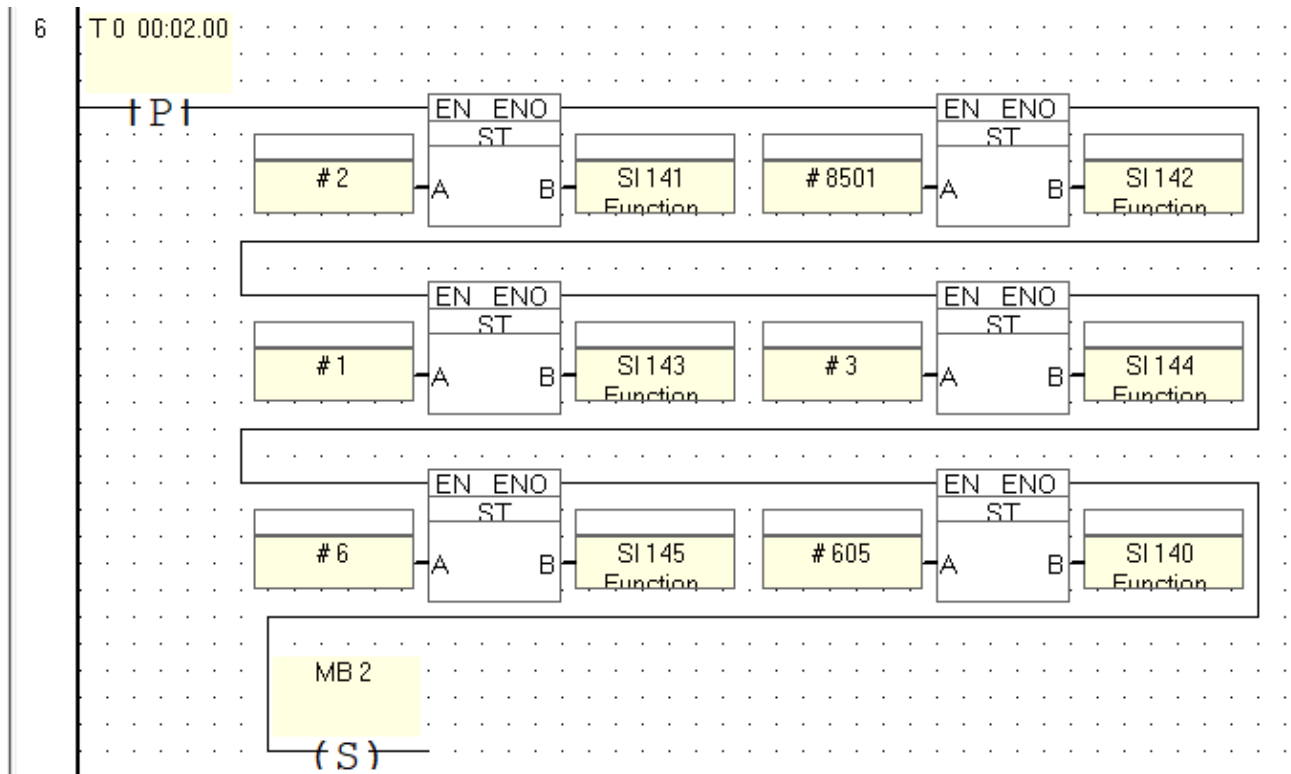


Fig. 20 – Ejemplo de escritura de un registro del variador por parte del PLC mediante “Modbus”

Como se puede observar, se vuelven a utilizar los registros especiales SI del PLC para que este entienda que se trata de una operación de escritura de registro en “Modbus”. Los registros utilizados y su significado son:

- SI 140 (#605): Establece la operación de escritura de registro.
- SI 145 (#6): Valor a escribir en el variador.
- SI 144 (#3): tipo de operando que se va a utilizar. El valor 3 indica un entero de memoria (MI) que es un tipo de variable de uso general por parte del PLC
- SI 143 (#1): Cantidad de registros a escribir.
- SI 142 (#8501): Dirección de memoria donde se encuentra alojado el registro.
- SI 141 (#2): Identificador de dispositivo en la red “Modbus”.

Para la lectura de un registro se arma la red Ladder de la misma manera que en el caso anteriormente explicado, pero en el SI 140 se establece el valor #604 y en el SI 145 se indica en que variable, del tipo MI, se insertara el valor leído.

Obtuvimos del manual del variador, las siguientes direcciones de memoria de los registros que debemos escribir y leer de forma que el variador funcione como deseamos:

- Dirección 8501: palabra de control. Establece el avance (valor 15), el frenado (valor 7) y la parada de emergencia (valor 6) del motor.
- Dirección 8502: set point del motor. Establece la velocidad del motor (en 1/10 Hz).
- Dirección 5201: registro que contiene los valores de las entradas digitales del variador. Se usan los primeros 4 bits de este para determinar el estado de cada entrada. Leeremos este registro para establecer si el variador está en modo manual, automático o apagado.

2.4.2 Marco teórico-práctico para la determinación del corte óptimo de masa

Para entender que es el corte óptimo de masa, nos valdremos de la Fig. 21 que muestra los distintos tipos de corte que puede hacer la estampadora según su configuración.

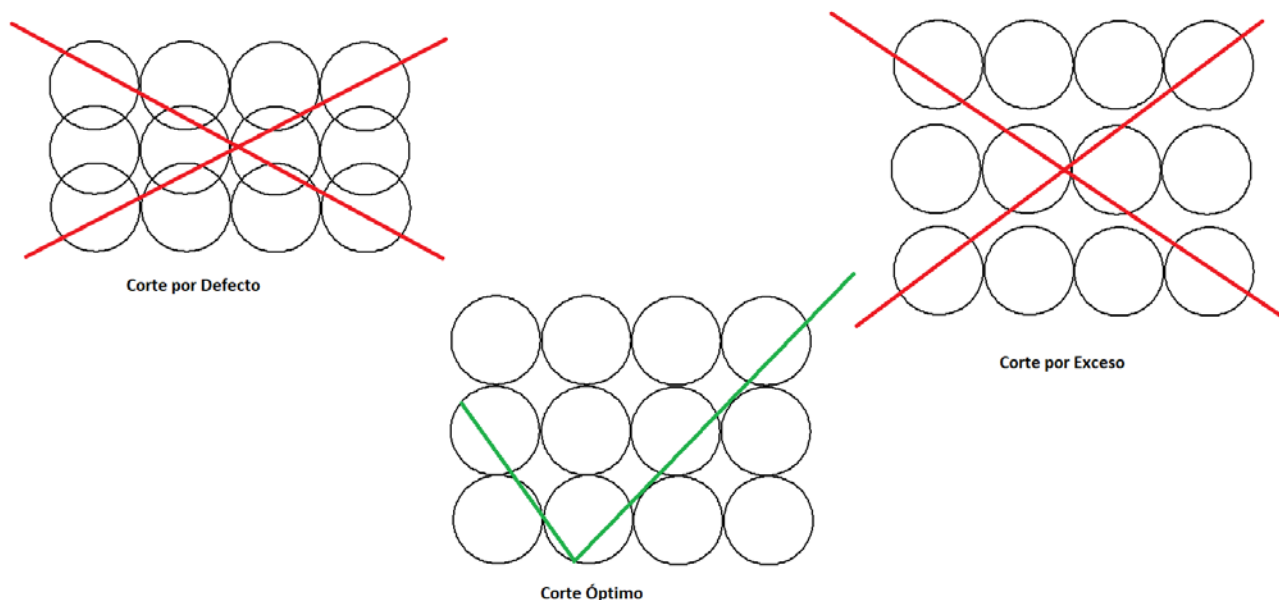


Fig. 21 – Bosquejo de distintos tipos de corte según configuración de velocidad de los variadores

Podemos ver que, si la cinta de corte tiene un desplazamiento más grande que el diámetro de los moldes de corte, se produce un corte por exceso, desperdiciando masa. A su vez que, si los moldes de corte bajan mientras que el desplazamiento de la cinta es menor, se produce un corte por defecto, es decir, termina encimándose los cortes, una vez más desperdiciando masa. Es por ello que debemos establecer una relación óptima entre el movimiento de corte de los moldes y el desplazamiento de la cinta transportadora, que a su vez se relacionan con la laminadora y la cinta transportadora. De esta forma, nos aseguraríamos un corte de galletitas perfecto y con mínimo desperdicio.

Para lograr esto, primeramente, debemos entender que el desplazamiento de la lona está relacionado con la cantidad de pulsos que nos devuelve el encoder (referirse a Fig.10). Estos son acumulados en un contador y éste es reseteado cada vez que el escéntrico finaliza una vuelta (referirse a Fig. 9).

Debido a que no podemos controlar los tiempos de avance y frenado de la cinta de corte, ya que estos dependen del brazo de transmisión (criquet), procedemos a controlar el desplazamiento de la cinta por medio de la regulación de este brazo. Esto se logra a través de un motor de CD (Fig. 8) que acorta o prolonga el alcance del mismo. Ya que el encoder en una vuelta nos entrega 720 pulsos y el diámetro del rolo es de 38 mm, es decir, que el recorrido al realizar una vuelta es de 118 mm, por lo tanto:

$$\begin{aligned} 720 [\text{pulsos}] &- -118 [\text{mm}] \\ \text{contador} [\text{pulsos}] &- -\text{recorrido de cinta} [\text{mm}] \end{aligned}$$

Recorrido alcanzado por la lona será:

$$\text{recorrido de lona (contado por encoder)} = \frac{\text{contador} * 118 \text{ mm}}{720 \text{ pulsos}}$$

Ecuación 1 – Recorrido de lona (contado por encoder)

Con esta ecuación podremos determinar el avance de la cinta dependiendo de la posición del brazo de transmisión.

2.4.2.1 Desarrollo teórico para encontrar modelo matemático de la automatización

Ahora procederemos a encontrar el modelo matemático que mejor describe la relación entre las distintas velocidades de los motores para que regulando uno solo de estos, los demás lo hagan solos.

Para comenzar a ver los modelados de las ecuaciones de frecuencias entre los distintos variadores debemos comenzar por ver determinadas consideraciones.

Como por ejemplo la diferencia de velocidades nominales de los motores, las distintas reducciones, la diferencia de avances debido a los diámetros de los rolos, entre otros.

Además, como el desplazamiento de la masa a través las distintas maquinas es distinto, debido a que en la cinta transportadora y en la laminadora se mueve con una velocidad tangencial a la velocidad angular de los rolos, mientras que en la estampadora la velocidad está dada por la diferencia entre: el desplazamiento de la lona que produce el brazo con criquet (diámetro de molde configurado) y el tiempo en el que el escéntrico (esc) realiza 1/3 de vuelta (tiempo en el que se encuentra en movimiento la lona).

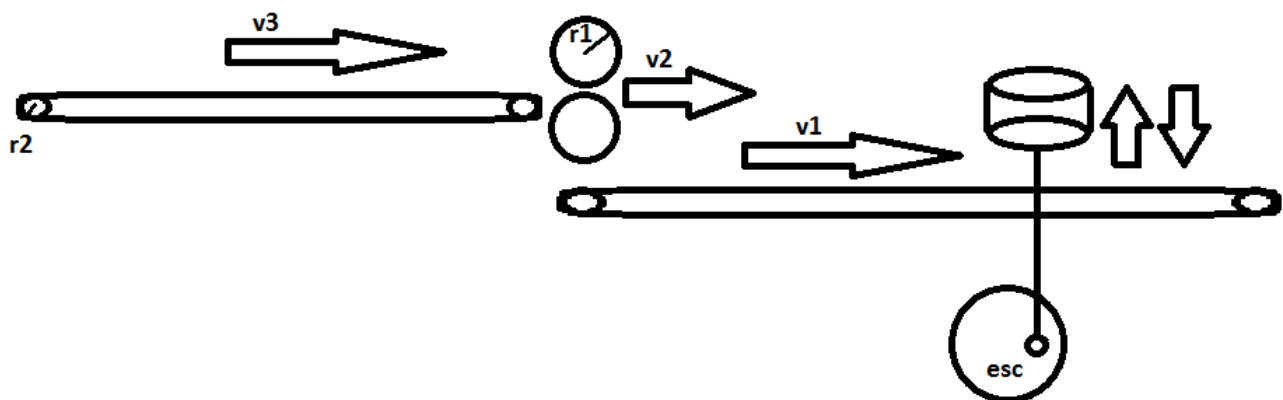


Fig. 22 – Bosquejo de las distintas velocidades de los motores en las 3 maquinas

Como señalamos antes, v_1 avanza y frena, por lo tanto, la velocidad de v_2 debe compensar la diferencia de avance teniendo en cuenta esto, por ello partiremos de:

$$v_1 = 3 * v_2$$

Ecuación 2 – Relación entre las velocidades de estampadora y laminadora

Ahora estas velocidades igualadas son tangenciales, por lo tanto, debemos aplicar las correspondientes fórmulas para llegar a una igualdad entre las velocidades en angulares nominales de los motores con sus correspondientes reducciones. Para posteriormente encontrar una relación entre las frecuencias de cada variador. Para lograr esto:

$$\frac{d}{t} = 3 * \omega_r * r_1 * \frac{2\pi}{60} \quad (1)$$

Ecuación 3 – Relación entre velocidad tangencial y angular de los rolos

Siendo:

d: diámetro de molde de corte.

t: tiempo en que la maquina se mantiene avanzando.

ω_r : velocidad angular de los rolos.

r1: radio de rolos laminadora.

Como sabemos el tiempo en el que se encuentra en avance la lona de la estampadora es el tiempo en el que tarda el escéntrico final (transmisión del motor luego de pasar por la reducción) en dar 1/3 de vuelta. Por lo tanto, sabemos que:

$$60 \text{ s} - - \omega_{esc}$$

$$t - - \frac{1}{3} \text{ revoluciones}$$

Entonces:

$$t = \frac{20}{\omega_{esc}}$$

Ecuación 4 – Tiempo de avance de lona

Dónde:

ω_{esc} : velocidad angular escéntrico.

Como la reducción del motor 1, encargado del desplazamiento de la lona (este caso) y de la subida y bajada de los moldes cortadores, no es realizada por motorreductores sino por poleas y correas, entonces debemos realizar los siguientes cálculos:

$$rel1 = \left(\frac{d1}{d2}\right)^n$$

Ecuación 5 – Relación de reducción por tren de poleas

dónde:

d1: diámetro de polea 1.

d2: diámetro de polea 2.

n: cantidad de pares de poleas.

Esta fórmula es válida ya que contamos con un tren de poleas de igual relación de reducción, es decir, cuentan con exactamente las mismas poleas. Las medidas de las mismas son:

d1: 45 mm.

d2: 250 mm.

n: 2.

Entonces, la relación de reducción del motor 1 será:

$$rel1 = \left(\frac{45}{250}\right)^2 \cong \frac{1}{30}$$

Ya que la reducción del motor 1 es de 1:30:

$$\omega_{esc} = \frac{\omega_1}{30}$$

$$t = \frac{20 * 30}{\omega_1}$$

Reemplazando en (1):

$$\frac{\omega_1 * d}{30 * 20} = 3 * \omega_r * r_1 * \frac{2\pi}{60}$$

Ecuación 6 – Reducción en el motor 1

Aplicando la correspondiente reducción al motor 2 para conseguir ω_r tenemos:

$$\frac{\omega_1 * d}{30 * 20} = 3 * r_1 * \frac{\omega_2}{100} * \frac{2\pi}{60}$$

Ecuación 7 – Reducción en el motor 2

Por último, debemos encontrar la relación final entre las frecuencias de los 2 motores teniendo ya la relación entre las velocidades angulares de los mismos:

$$\omega = \frac{60 * f}{p}$$

Ecuación 8 – Velocidad angular de un motor

dónde:

f: frecuencia de funcionamiento

P: número de par de polos

Ya que P en ambos motores es 2:

$$\frac{f_1 * d}{30 * 20} * \frac{60}{2} = \frac{3 * r_1 * 2\pi * f_2}{100 * 60} * \frac{60}{2}$$

$$f_2 = 0,589 * \frac{f_1 * d}{r_1}$$

Ecuación 9 – Frecuencia de la laminadora

Podemos concluir entonces, ya que r_1 es constante, que la frecuencia que debemos enviar al motor 2 va a depender únicamente del diámetro del molde con el que se esté cortando la máquina y de la frecuencia que se le esté dando al motor 1.

Ahora para encontrar la relación entre las frecuencias del motor 2 y el motor 3 de una manera similar, debemos partir de un análisis muy parecido al planteado anteriormente, solo que además esta vez debemos tener en cuenta el espesor inicial (e_i) y final (e_f) de la masa.

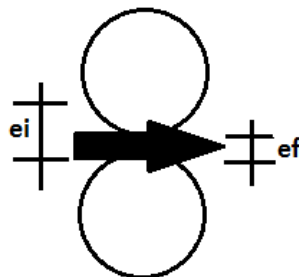


Fig. 23 – Bosquejo de la relación entre espesor inicial y final de la masa al pasar por laminadora

Antes de encontrar esta relación entre los espesores y cómo afecta a la frecuencia del motor 3, procedemos a encontrar la relación entre las frecuencias de los motores 2 y 3.

$$\frac{v3}{esp} = v2$$

Ecuación 10 – Vel. de laminadora en base a la de la cinta transportadora y relación de espesores

Al igual que en el caso anterior $v2$ y $v3$ son velocidades tangenciales a sus respectivos rolos, por lo tanto, debemos hacer las mismas transformaciones a las velocidades nominales de los respectivos motores. Mientras “esp” es un valor que se ve afectado por la relación entre los espesores de la masa que posteriormente calcularemos.

$$\frac{\omega r * r1}{esp} * \frac{2\pi}{60} = \omega_{ct} * r2 * \frac{2\pi}{60}$$

Ecuación 11 – Ecuación 10 en base a velocidades angulares y radios de los rolos

dónde:

$r2$: radio de los rolos de cinta transportadora + espesor lona.

ω_{ct} : velocidad angular de rolo de cinta transportadora.

En cuanto a la reducción correspondiente a la cinta transportadora, no solo debemos tener en cuenta la del motorreductor, sino también el de la cadena y engranajes (9 y 20 dientes). Quedando así:

$$rel3 = \left(\frac{9}{20}\right) * \left(\frac{1}{60}\right) = \frac{3}{400}$$

Ecuación 12 – Relación de reducción final en cinta transportadora

Entonces podemos decir que:

$$\frac{\omega2}{100} * \frac{r1}{esp} = \omega3 * r2 * \frac{3}{400}$$

Pasándolo a frecuencia:

$$\frac{f2}{100} * \frac{r1}{esp} * \frac{60}{2} = f3 * r2 * \frac{3}{400} * \frac{60}{2}$$

Sabiendo que r1=36 mm y r2=2.5 mm, obtenemos:

$$f3 = \frac{f2}{esp} * \frac{400}{3 * 100} * \frac{36 \text{ mm}}{2,5 \text{ mm}}$$

$$f3 = 19,2 * \frac{f2}{esp}$$

Ecuación 13 – Frecuencia del motor de la cinta transportadora

Una vez determinada la relación entre las frecuencias, ahora sí, nos queda encontrar la relación entre los espesores y ver cómo afecta a las mismas.

2.4.2.2 Pruebas para determinación de modelo matemático aproximado

Debido a que no existe predefinido un modelo matemático para la relación entre los espesores de masa al pasar por los rolos, tuvimos que realizar pruebas para poder así aproximarnos a uno:

Basándonos en los datos obtenidos en las siguientes tablas realizadas en pruebas en la maquina:

- **Espesor Inicial:** 10[mm] **Espesor Final:** 3[mm]

Frecuencias en motores: [Hz]

Laminadora	Cinta Transportadora
30	20
40	30
50	37
60	48

Tabla 1 – Prueba 1 de velocidades con relación de espesor de 3.3:1

- **Espesor Inicial:** 10[mm] **Espesor Final:** 5[mm]

Frecuencias en motores: [Hz]

Laminadora	Cinta Transportadora
30	30
40	35
50	45
60	55

Tabla 2 – Prueba 1 de velocidades con relación de espesor de 2:1

- **Espesor Inicial:** 15[mm] **Espesor Final:** 5[mm]

Frecuencias en motores: [Hz]

Laminadora	Cinta Transportadora
30	20
40	30
50	40,5
60	55

Tabla 3 – Prueba 2 de velocidades con relación de espesor de 3:1

- **Espesor Inicial:** 15[mm] **Espesor Final:** 7,5[mm]

Frecuencias en motores: [Hz]

Laminadora	Cinta Transportadora
30	30
40	35
50	45
60	55

Tabla 4 – Prueba 2 de velocidades con relación de espesor de 2:1

- **Espesor Inicial:** 20[mm] **Espesor Final:** 10[mm]

Frecuencias en motores: [Hz]

Laminadora	Cinta Transportadora
30	30
40	35
50	45
60	55

Tabla 5 – Prueba 3 de velocidades con relación de espesor de 2:1

- **Espesor Inicial:** 10[mm] **Espesor Final:** 10[mm]

Frecuencias e motores: [Hz]

Laminadora	Cinta Transportadora
30	50
50	80

Tabla 6 – Prueba 1 de velocidades con relación de espesor de 1:1

De las pruebas anteriores podemos apreciar que sin importar los valores de los espesores inicial y final, los valores de frecuencia dependen de la razón entre los mismos, es decir, nuestra variable será e_i/e_f :

e_i/e_f	esp
1	12
2	21,21
3	25,2
3,3	26,5

Tabla 7 – Valores de “esp” en relación a los espesores finales e iniciales de masa

2.4.2.3 Elección del modelo matemático más apto para implementación práctica

Dados estos valores podemos aproximar la respuesta a 3 modelos matemáticos:

- **Lineal:**

Tomamos 2 puntos de los datos anteriores:

A (2;21,21) y B (3;25,2)

$$esp = m * \left(\frac{ei}{ef}\right) + c$$

$$\begin{cases} 21,21 = m * 2 + c \\ 25,2 = m * 3 + c \end{cases}$$

$$esp = 4 * \left(\frac{ei}{ef}\right) + 13,2$$

Ecuación 14 – Aproximación lineal para determinación de variable “esp” en base a espesores lineales y finales

- **Cuadrática:**

Tomamos 3 puntos de los datos anteriores:

A (1; 12), B (2;21,21) y C (3;25,2)

$$esp = a * \left(\frac{ei}{ef}\right)^2 + b * \left(\frac{ei}{ef}\right) + c$$

$$\begin{cases} 12 = a * 1 + b * 1 + c \\ 21,21 = a * 4 + b * 2 + c \\ 25,2 = a * 9 + b * 3 + c \end{cases}$$

$$esp = -2,6 * \left(\frac{ei}{ef}\right)^2 + 17 * \left(\frac{ei}{ef}\right) - 2,43$$

Ecuación 15 – Aproximación cuadrática para determinación de variable “esp” en base a espesores lineales y finales

- **Exponencial:**

Tomamos 2 puntos de los datos anteriores:

A (1;12), B (2;21,21)

$$esp = a * b^{\left(\frac{ei}{ef}\right)}$$

$$\begin{cases} 12 = a * b \\ 21 = a * b^2 \end{cases}$$

$$esp = 21,21 * 1,7^{\left(\frac{ei}{ef}\right)}$$

Ecuación 16 – Aproximación exponencial para determinación de variable “esp” en base a espesores lineales y finales

Los 2 modelos que más se asemejan a la respuesta dada en las pruebas son la cuadrática y la exponencial. Pero debido a limitaciones en las operaciones que puede realizar el PLC optamos por utilizar el modelo cuadrático.

Por lo tanto, finalmente tenemos que la relación de frecuencias entre el motor 2 y motor 3 es:

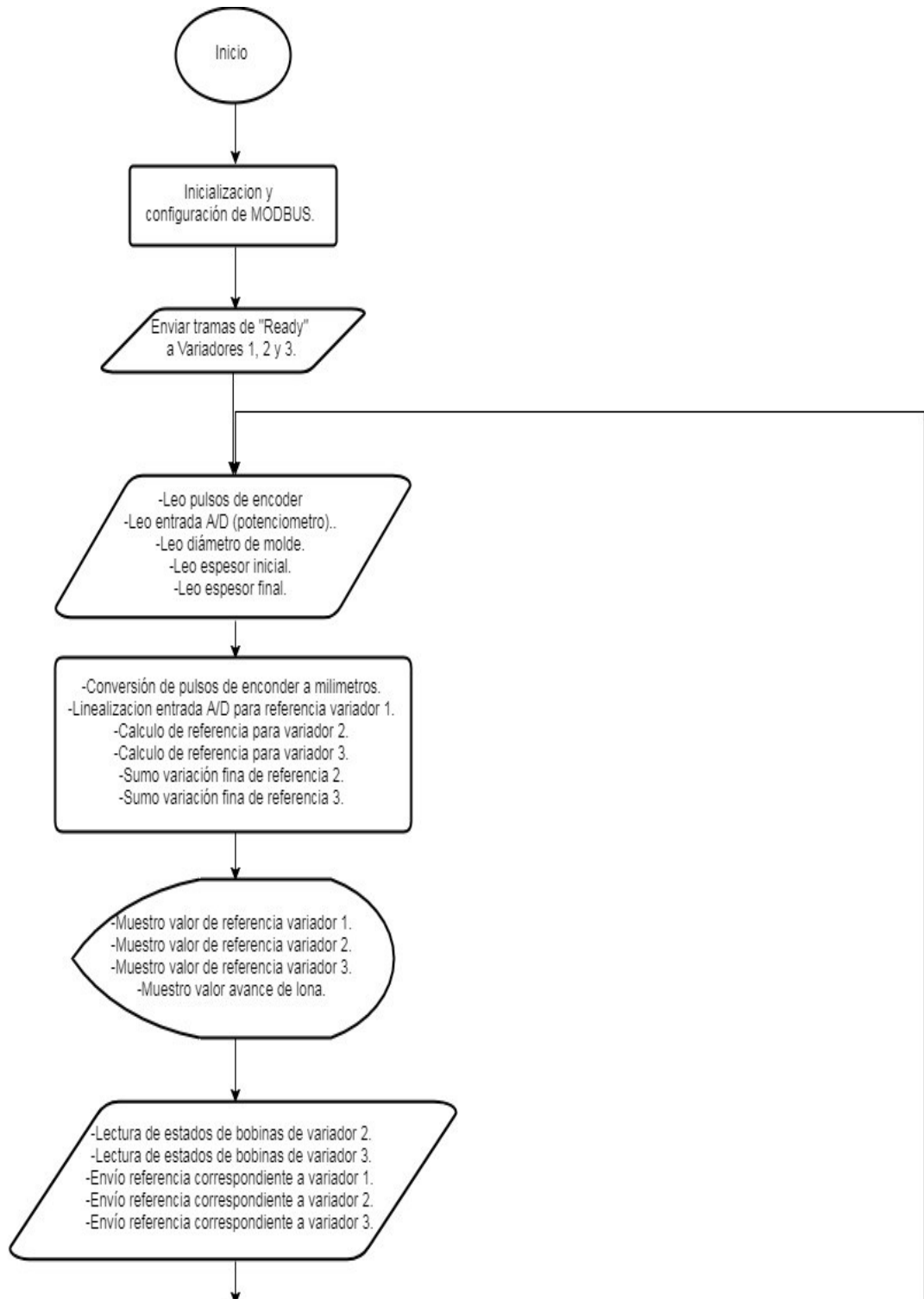
$$f3 = \frac{19,2 * f2}{-2,6 * \left(\frac{ei}{ef}\right)^2 + 17 * \left(\frac{ei}{ef}\right) - 2,43}$$

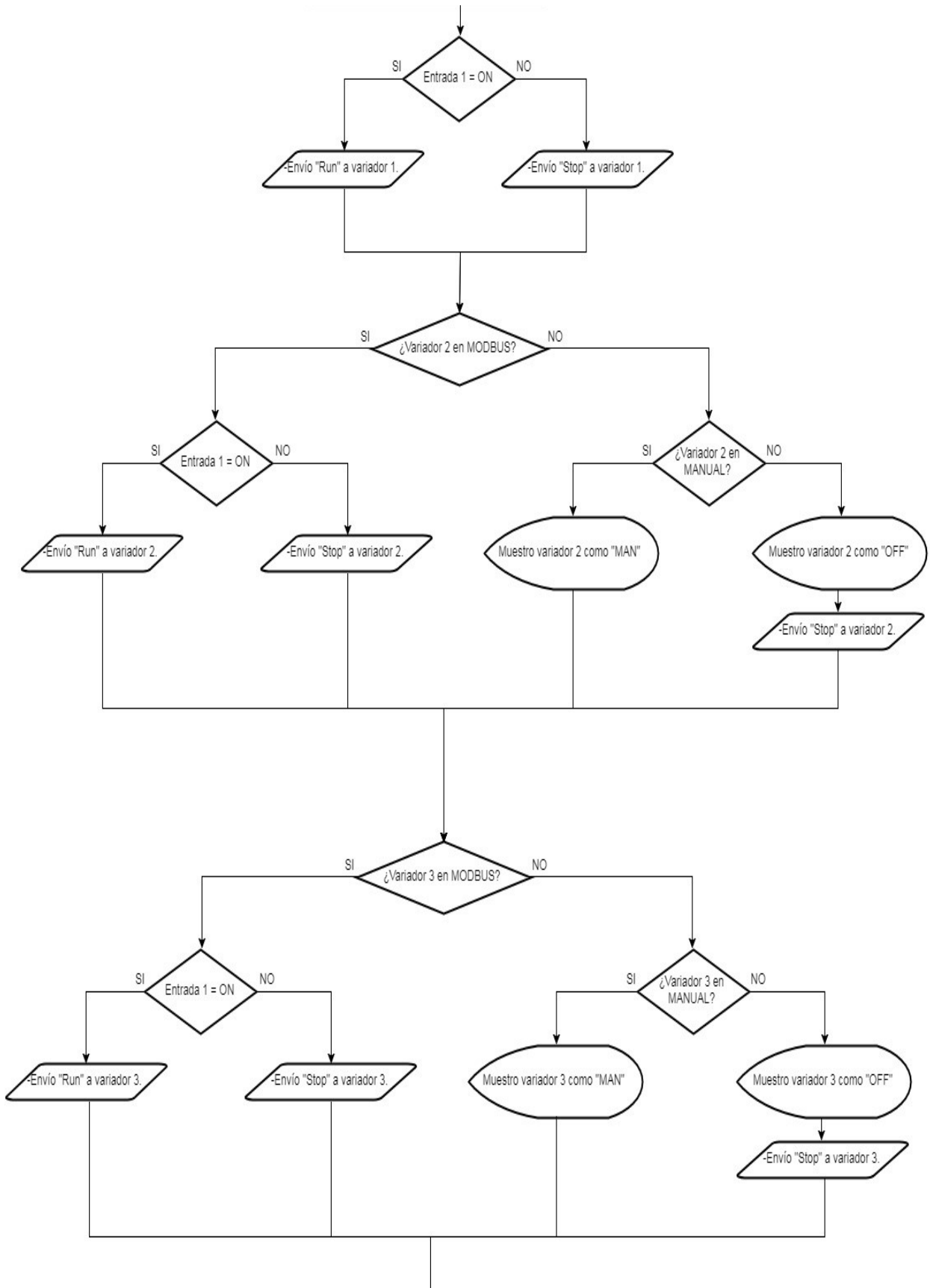
Ecuación 17 – Frecuencia de cinta transportadora utilizando modelo cuadrático de aproximación

Podemos concluir como en el caso anterior que la frecuencia que debemos enviar al motor 3 va a depender de la frecuencia que se le esté dando al motor 2 y de la razón entre el espesor inicial y espesor final.

2.4.3 Diagrama de flujo del programa implementado en el PLC

En el siguiente diagrama de flujo, se muestra la lógica implementada para la automatización. Como recordaremos, el PLC es el encargado de realizar todas las tareas de inserción de datos (por medio del HMI), lectura/escritura de entradas analógicas y digitales, y de comandar los variadores mediante "Modbus", siguiendo el modelo matemático desarrollado en los incisos anteriores. Se trató de hacer este diagrama lo más sencillo posible, para que la lectura y comprensión del mismo no revista demasiada dificultad.





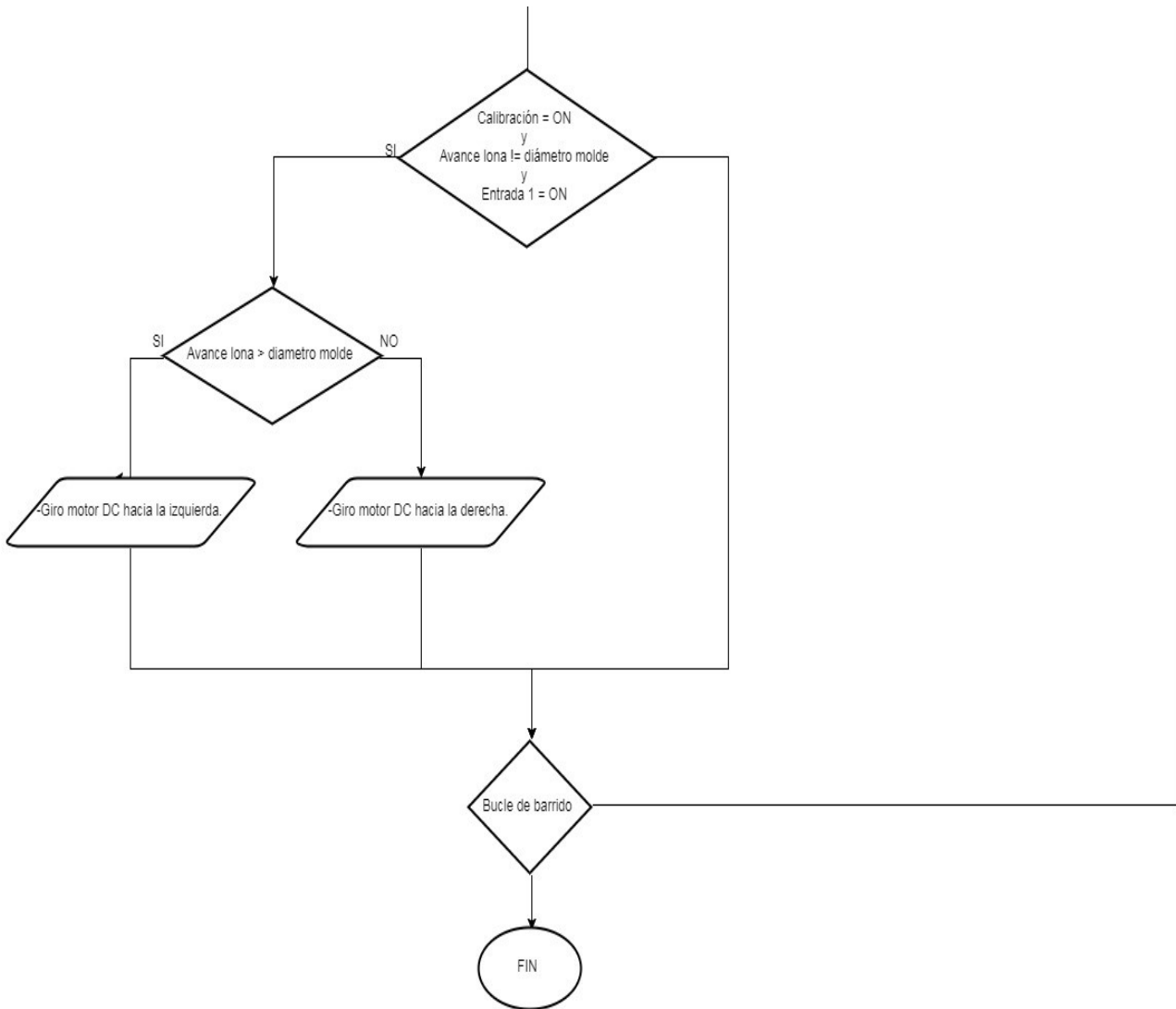


Fig. 24 – Diagrama de flujo de datos del programa en el PLC

2.5 Diseño Completo

Como varios de los elementos estaban previamente en la máquina, nos centraremos solo en los elementos que son específicos de la automatización. Para los diseños eléctricos donde se pueden ver el PLC con su fuente y las conectores RJ12/45 para el bus “Modbus” referirse a las Fig. 13 a 15.

En la Fig. 24 podemos ver la máquina entera ya con todos los elementos de automatización integrados a la misma, conviviendo armoniosamente con los otros elementos ya existentes.



Fig. 25 – Foto de laminadora con automatización incorporada

Veremos en las siguientes imágenes diferentes pantallas del HMI del PLC que van a interactuar con los panaderos mostrando los estados de los motores en cada momento y la sencillez de calibración para cambiar moldes.



Fig. 26 – Pantalla Inicial del PLC



Fig. 27 – Pantalla de calibración de moldes y espesores de masa



Fig. 28 – Pantalla para mostrar motores apagados o manual

Se puede ver en las Fig. 26 a 28 que el PLC va guiando al panadero por los procesos de calibración, le avisa en todo momento que diámetro actualmente tienen los moldes, que velocidades tienen en todo momento los motores y si están en modo automático o manual para regulación en el lugar de los mismos.

Resultados

Los resultados de la automatización de la estampadora han sido más que satisfactorios, no solo en términos de reducción de desperdicios de masa, sino a su vez en facilidad de uso y seguridad, agregando nuevas funcionalidades a la vieja estampadora.

Como se ha visto en el apartado “Diseño Completo” se ve como el PLC guía al panadero en cada momento sobre el estado general de las 3 máquinas separadas y con solo tocar unos simples botones, este puede configurar cada elemento a gusto (siempre dentro de los parámetros previamente establecidos).

En términos de prestaciones, se pueden nombrar las siguientes respecto a la versión no automatizada:

- PLC con HMI para más fácil manejo por parte del panadero.
- Corte perfecto de galletita con desperdicio mínimo de masa.
- Ahorro de tiempo en todo el proceso de corte de masa (configuración de motores, calibración de moldes, calibración fina de motores individuales).
- Sensor de seguridad para el cese de funcionamiento al abrir la reja donde están alojados los moldes.
- Mejora a la parada de emergencia para que corte toda la maquinaria, no solo los motores.
- Lectura en todo momento de valores de velocidades de los motores y el diámetro actual de los moldes y mostrado en el PLC.
- Mejoras en la introducción de los parámetros en el PLC con detección y corrección de errores en él.

Como podemos apreciar, las mejoras introducidas no solo son vastas en cantidad sino también en términos de calidad, eficiencia y seguridad.

Apreciaremos en las siguientes imágenes lo que nosotros llamamos el corte óptimo de galletitas porque pensamos que verlo plasmado es más significativo que un esquema o con simples palabras.



Fig. 29 – Imagen de masa cortada por moldes de 60 mm



Fig. 30 – Imagen de masa cortada por moldes de 80 mm

Como se observó, la maquina corta una galletita al ras de la otra, provocando desperdicio mínimo.

Otra mejora como habíamos dicho previamente, era la de incorporar un sensor inductivo en la rejilla de seguridad para evitar accidentes en el caso de apertura accidental de la misma, parando toda la máquina.

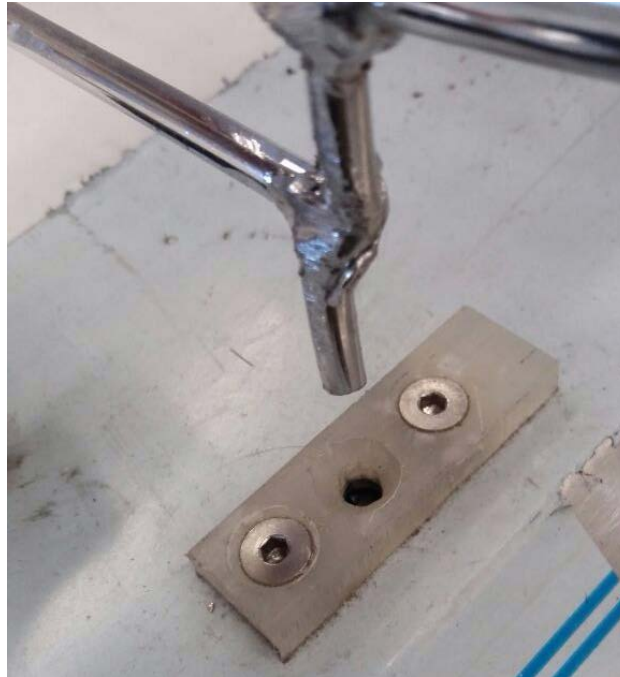


Fig. 31 – Incorporación de sensor inductivo para corte de máquina, en rejilla de seguridad

Finalmente, otra de las mejoras significativas, fue como dijimos la incorporación de toda la lógica de automatización en el PLC, que además cuenta con HMI incorporado. Se puede observar en un folleto de ventas provisto por Industrias Zunino SRL, la estampadora en su versión previa sin automatización, que esta contaba con un panel de control muy básico.

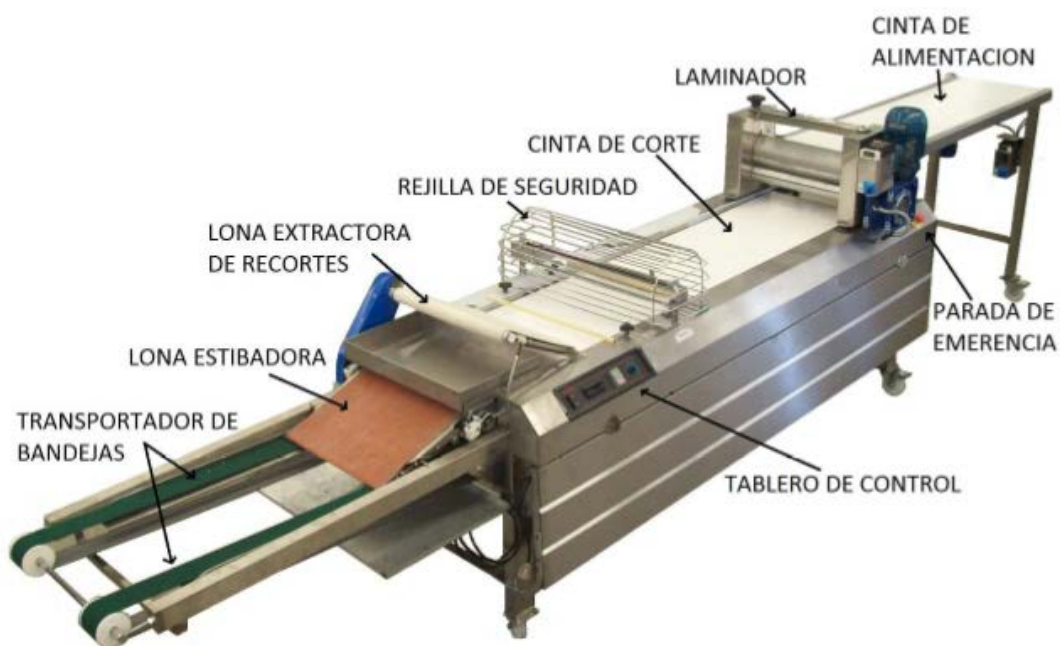


Fig. 32 – Folleto comercial de estampadora sin automatizar

Análisis de Costos

Comenzaremos a desarrollar el análisis de costos para una sola unidad, para luego hacer un análisis de desarrollo en lote y ver el abaratamiento de costos de producción de la automatización.

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
1	PLC Unitronics M91-2-R1	\$ 6.300	\$ 6.300
1	Fuente de alimentación de 220V a 24V DC 4,2A	\$ 750	\$ 750
1	Encoder ISC3806-360BZ1-5-24-F	\$ 2.000	\$ 2.000
1	Sensor inductivo I8CF-M1805 N/A	\$ 1.100	\$ 1.100
1	Sensor final de carrera Neumann	\$ 250	\$ 250
2	Switch ON/OFF/ON 3 pines	\$ 60	\$ 120
5	Conector macho rj45	\$ 25	\$ 125
1	Conector macho rj12	\$ 25	\$ 25
2	Conector hembra rj45	\$ 50	\$ 100
3	Cable UTP x metro	\$ 40	\$ 120
320	Horas hombre de trabajo	\$ 260	\$ 83.200
		Total	\$ 94.090

Tabla 8 – Costo total de automatización para una unidad

Como podemos apreciar el precio final de la automatización de la maquina no es muy accesible debido que el precio de las horas de diseño e implementación del proyecto son plasmadas en una sola máquina, por ello al realizar el mismo análisis, pero en 50 unidades veremos que el costo se reduce considerablemente:

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
50	PLC Unitronics M91-2-R1	\$ 6.062	\$ 303.100
50	Fuente de alimentación de 220V a 24V DC 4,2A	\$ 636	\$ 31.800
50	Encoder ISC3806-360BZ1-5-24-F	\$ 1.895	\$ 94.750
50	Sensor inductivo I8CF-M1805 N/A	\$ 930	\$ 46.500
50	Sensor final de carrera Neumann	\$ 173	\$ 8.650
100	Switch ON/OFF/ON 3 pines	\$ 25	\$ 2.500
250	Conector macho rj45	\$ 15	\$ 3.750
50	Conector macho rj12	\$ 15	\$ 750
100	Conector hembra rj45	\$ 25	\$ 2.500
150	Cable UTP x metro	\$ 20	\$ 3.000
320	Horas hombre de trabajo	\$ 260	\$ 83.200
		Total x 50u	\$ 580.500
		Total x u	\$ 11.610

Tabla 9 – Costo total de automatización para lote de 50 unidades

Esta reducción de costo se debe no solo al descuento por compra de insumos por mayor, sino también, como ya se dijo antes, a que las horas de trabajo se dividen en esta cantidad de máquinas producidas.

Sabiendo que el precio final aproximado de la maquina es de \$200.000; la suma de la automatización influiría solo con un aumento de aproximadamente el 5%. El cual es sumamente remunerable en comparación al tiempo que se ahorra el operario en la calibración manual de todos los componentes de la máquina.

En caso de que el comercio ya posea la estampadora sin automatizar, se le podría realizar la “actualización del sistema”, cobrándole solamente el precio unitario compensado en 50 unidades sumado a la mano de obra y la puesta en marcha de la máquina.

Discusión y conclusiones

Nos habíamos encontrado primeramente con 3 máquinas totalmente independientes sin un funcionamiento armonioso entre sí. Es por ello, que vimos una oportunidad de plasmar nuestros conocimientos adquiridos en estos años de estudio, generando un producto de alta competitividad en el negocio de la industria panadera y que nos pueda dar un beneficio económico en el futuro (si deseáramos implementarlo por nuestra cuenta).

Hemos cumplido ampliamente con las expectativas propuestas al inicio del proyecto. Se ha logrado un sistema robusto, confiable, de fácil uso y configuración por parte de cualquier operario. Los costos iniciales fueron un tanto elevados, dado que fue pensado solo para una sola máquina, pero la gerencia de Industrias Zunino SRL ha visto cómo estas mejoras le pueden generar un rédito económico aún mayor y es por ello que han decidido implementarlo en todas sus estampadoras de ahora en más.

Se ha pedido a operarios de la fábrica para que prueben el sistema y todos han recalcado lo sencillo que les fue manipular la máquina en relación a su análoga sin automatizar. Comentaron con agrado, además, lo intuitivos que son los controles y la navegación a través de las distintas pantallas de HMI, así como la corrección automática de errores de ingreso de parámetros.

Vemos como posibles mejoras, ciertas cuestiones como:

- El uso de motores paso a paso para la eliminación de los elementos mecánicos, disminuyendo considerablemente el desgaste y el mantenimiento periódico de los mismos, como así también mayor precisión en el control de avance de las lonas.
- Cambio del excéntrico por algún motor de empuje de cilindro lineal para mayor precisión en los cortes, tanto en tiempo como en eficiencia.
- Cambiar la roseta por terminales RJ45 para la industria haciendo más robusto el conexionado entre las máquinas. Así también, implementar cableado mallado para reducción de interferencias electromagnéticas.
- Manejo independiente de cinta transportadora de bandejas para una disposición más eficiente del producto final en las mismas.

Bibliografía

- <http://www.industriaszunino.com/>
- http://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf
- <https://unitronicsplc.com/Download/SoftwareHelp/U90LadderKnowledgebase/Communications/MODBUS.htm>
- <https://unitronicsplc.com/wp-content/uploads/2015/12/M91-2-R1-540902507.pdf>
- <https://inverterdrive.com/file/Schneider-ATV12-Modbus-Comm-Manual>
- http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_pol_trenpoleas.htm
- <https://yoreparo.com/industria/electricidad/preguntas/813941/relacion-entre-hz-y-rpm>
- <https://ar.answers.yahoo.com/question/index?qid=20091022071337AAg5r1t>
- https://www.vitutor.com/geo/rec/d_7.html
- <http://frodriguezdiaz.blogspot.com.ar/2013/11/parabola-que-pasa-por-3-puntos.html>
- <http://rinconmatematico.com/foros/index.php?action=printpage;topic=39019.0>

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Paraná

Se certifica que: Armando Maxit, DNI: 22308146 ha realizado la dirección del Proyecto Final:

“Automatización de Estampadora de Masas para la Industria Panadera”

De los alumnos:

- Cabrera, Dardo Alfredo
- Giorgetti, Juan Ignacio

Realizada durante el ciclo lectivo: 2017, obteniendo el grupo un calificación final de:

A fin de ser emitida la correspondiente certificación por el departamento de electrónica, se extiende la siguiente constancia.

Pañoni Sergio

Ramos Héctor

Maggiolini Lucas