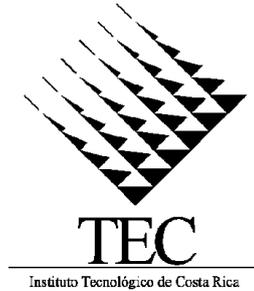


Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



**PRIMERA ETAPA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLIENDA
Y COCIMIENTO DEL MAÍZ PARA DEMASA**

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

Luis Enrique Solórzano Vásquez

Cartago, enero 2010



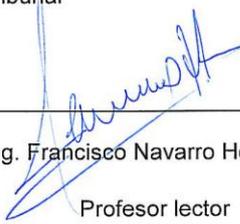
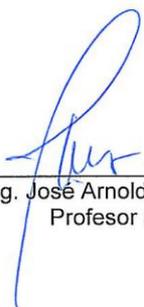
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR**

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

Estudiante: **Luis Enrique Solórzano Vásquez**

Nombre del Proyecto: Primera etapa de automatización del proceso de molienda y cocimiento del maíz para DEMASA.

Miembros del Tribunal

 _____ Ing. Marvin Hernández Cisneros Profesor lector	 _____ Ing. Francisco Navarro Henríquez Profesor lector
 _____ Ing. José Arnoldo Rojas Coto Profesor asesor	

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

Cartago, 22 de enero de 2010

Declaración de Autenticidad

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

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

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

Cartago, enero 2010



Luis Enrique Solórzano Vásquez

Ced: 2-0605-0074

Resumen

Los retos constantes que enfrenta la industria actual, conllevan a las empresas a buscar nuevas tecnologías con el fin de modernizarse y así lograr una mayor y mejor producción. DEMASA no es la excepción, se dedica al cocimiento y molienda del maíz y tiene como meta llevar un producto de gran calidad a los mercados nacionales e internacionales.

Con la realización de este proyecto se mejoran varios de los procesos que se dan en la planta de DEMASA, específicamente en el molino, en donde se cocina y muele el maíz para obtener harina. La mayoría de las dificultades que se presentan en este sector de la empresa, radican en el control inadecuado de las diferentes variables que influyen en el sistema, como son las presiones de agua, aire y vapor, niveles de los silos, el control de motores, la dosificación de aditivos y control de válvulas de direccionamiento de la harina.

Estas dificultades pueden llegar a provocar problemas en la producción, que van desde un mal direccionamiento de la harina, tuberías obstruidas, paros forzados de las máquinas encargadas del proceso, hasta la obtención de un producto final que no cumple con las especificaciones necesarias para el mercado.

Analizando estos problemas se llega a la conclusión de que se producen por el poco control y descentralización de las variables del proceso. La solución a la problemática existente se enfoca en centralizar todas las variables del proceso, obteniendo la posibilidad de monitorizarlas y controlarlas, utilizando una pantalla táctil como interfaz.

Palabras Clave: maíz, harina de maíz, molino, silo, válvula solenoide, variador de frecuencia, sensor de radar (TDR), PLC.

Abstract

The constant challenges faced by today's industry, encourage companies to look for new technologies with the purpose of modernizing themselves and therefore, achieving a more effective and efficient production. DEMASA is not the exception to these challenges. While dedicating to the milling and processing corn, it seeks to showcase great quality products to the national and international markets.

With the completion of this project, several processes that take place at the DEMASA plant, specifically at the mill, where corn is cooked and milled before it becomes flour. Most difficulties found at this stage of the process reside in the inadequate control of the different variables that influence the system, such as pressure, level of silos, motor control, additive dosing and diverter valve control.

These difficulties may eventually lead to production problems, ranging from bad routing of flour, clogged pipes or unexpected machinery downtime, to final product quality being jeopardized because of deficient production processes.

An engineering analysis of these problems leads to the conclusion that their root cause is centered in the instability and decentralization of process variable controls. The proposed solution focuses in the centralization of these variables in a PLC from where they can be monitored and controlled through a human machine interface (HMI)

Keywords: corn, flour corn, mill, silo, solenoid valve, variable-frequency drive, Guided Wave Radar transmitters, PLC

Dedicatoria

A mis padres Doris y Enrique, por darme todo su apoyo, comprensión y amor en estos años de estudio universitario. Y ayudarme a alcanzar esta meta.

Los amo.

Agradecimiento

Antes que nada agradecerle a Dios y a la Virgen de los Ángeles por todas las bendiciones recibidas; a mis padres Doris y Enrique; a mis hermanos Cristofer y Rebeca; a mi novia Marcia. Por creer en mí y brindarme su apoyo, cariño y comprensión.

Índice General

Capítulo 1: Introducción	11
1.1 Problema existente e importancia de su solución	11
1.2 Solución seleccionada.....	14
Capítulo 2: Meta y objetivos	16
2.1 Meta	16
2.2 Objetivo general.....	16
2.3 Objetivos específicos	16
2.3.1 Hardware	16
2.3.2 Software.....	16
2.3.3 Documentación.....	17
2.3.4 Implementación	17
Capítulo 3: Marco teórico	18
3.1 Descripción del proceso a mejorar.....	18
3.2 Antecedentes bibliográficos.....	20
3.2.1 Descripción PLC (Controlador Lógico Programable).....	20
3.3 Descripción de los principales principios electrónicos	
relacionados con la solución del problema	22
3.3.1 Señal 4-20mA	22
3.3.2 Protocolos de comunicación utilizados	23
3.3.3 Variador de frecuencia (VDF).....	25
3.3.4 Tornillo sinfín.....	27
3.3.5 Válvula solenoide	27
3.3.6 Micro switch	28
3.3.7 Interruptor de nivel de paleta rotativa.....	28
Capítulo 4: Procedimiento metodológico	29
4.1 Reconocimiento y definición del problema	29
4.2 Obtención y análisis de información	30
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución	30
4.4 Implementación de la solución	33
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	37
5.1 Distribución física de los equipos	37
5.2 Descripción del software utilizado	41
5.3 Solución final.....	43
5.3.1 Control de variadores de frecuencia y automatización.....	
de la dosificación de cal al macerador.....	43
5.3.2 Monitoreo del nivel del silo de reposo.	53
5.3.3 Monitoreo de presiones	56
5.3.4 Direccionamiento de la harina	59
Capítulo 6: Resultados y análisis	65
6.1 Resultados.....	65
6.2 Análisis	69
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	71
Bibliografía	73
Apéndice	75
A.1 Abreviaturas.....	75
A.2 Glosario	75
A.2 Manual de usuario	76
A.3 Planos de módulos del PLC.....	84

Índice de figuras

Figura 1.1	Macerador y silo de reposo	11
Figura 1.2	Diagrama de bloques general del sistema.....	12
Figura 1.3	Parte superior silo de reposo - Segundo piso de la planta.....	13
Figura 1.4	Diagrama de bloques general de hardware del proyecto	15
Figura 3.1	Macerador	18
Figura 3.2	Silo de reposo.....	19
Figura 3.3	Diagrama general del proceso del maíz	20
Figura 3.4	Circuito señal 4-20mA a una señal 1-5V	22
Figura 3.5	Comunicación digital HART superpuesta en la señal analógica 4-20mA...23	
Figura 3.6	Diagrama del variador de frecuencia.	26
Figura 3.7	Sección de un gusano sinfín.....	27
Figura 4.1	Sensor de radar y sensor ultrasónico.....	31
Figura 4.2	Sensor de radar de onda guiada.....	33
Figura 5.1	Gabinete de control y gabinete de potencia	38
Figura 5.2	Distribución de partes en el gabinete 1	39
Figura 5.3	Switch Ethernet ICP DAS NS-205	40
Figura 5.4	Distribución del gabinete de potencia.....	40
Figura 5.5	Pantalla principal del programa RSLogix 500.....	41
Figura 5.6	Pantalla principal del FactoryTalk View Studio ME.....	42
Figura 5.7	Variador de Frecuencia Micromaster 420 del gusano sinfín del maíz.....	44
Figura 5.8	Bornes de mando del Micromaster 420	49
Figura 5.9	Conexión del relé (R) para el encendido y apagado del VDF	49
Figura 5.10	Pantalla para manejo de los variadores de frecuencia.....	51
Figura 5.11	Pantalla para el control automático de la cal.....	52
Figura 5.12	Descripción del talud dentro de un silo (parte superior).....	54
Figura 5.13	Instalación del sensor en el silo.	54
Figura 5.14	Pantalla LCD del TDR.....	55
Figura 5.15	Pantalla principal de monitoreo del silo de reposo	56
Figura 5.16	Sensor de presión Honeywell ST3000 S900.....	57
Figura 5.17	Circuito de comunicación HART	57
Figura 5.18	Pantalla para monitoreo de las presiones.	59
Figura 5.19	Válvula desviadora.....	60
Figura 5.20	Válvula desviadora con solenoide y MicroSwitch instalado.	61
Figura 5.21	Micro Switch instalado en la válvula desviadora.....	62
Figura 5.22	Diagrama de flujo para el direccionamiento de la harina	63
Figura 5.23	Pantalla para el control y monitoreo del direccionamiento de la harina... 64	

Índice de tablas

Tabla 3.1	Módulos que conforman el PLC.....	21
Tabla 5.1	Ubicación de los módulos del PLC por ranuras en los dos racks.....	39
Tabla 5.2	IP de cada dispositivo	43
Tabla 5.3	Cálculo de relación de los gramos de cal por minuto por cada Hertz del variador de frecuencia.....	46
Tabla 5.4	Flujo de maíz por minuto para 35Hz y 40Hz	47
Tabla 5.5	Cantidad de cal y maíz por Hz.....	48
Tabla 5.6	Descripción de los parámetros reprogramados del VDF.....	50
Tabla 5.7	Características de los motores	50
Tabla 5.8	Enclavamiento de los VDF del Molino	52
Tabla 5.9	Parámetros configurados para el funcionamiento del Sensor de Radar	55
Tabla 5.10	Rangos de presión de los sensores.....	58
Tabla 5.11	Estado de las válvulas cuando el destino de almacenamiento es la tolva 3.	63
Tabla 6.1	Valores de Set Point y Process Value de los motores controlados.....	65
Tabla 6.2	Valores de SP y PV para modo automático de dosificación de la cal.....	66
Tabla 6.3	Mediciones para confirma de funcionamiento del sensor TDR	67
Tabla 6.4	Cuadro comparativo de mediciones realizadas por el sensor y mediciones realizadas por los operarios mediante las ventanas del silo (método anterior).....	68

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se da una descripción global del proceso en la planta de molino en DEMASA, con el fin de brindar una idea básica del sistema en que se enmarca el proyecto por desarrollar. Además, se expone de forma clara cuál es el problema presente en este sector de la empresa, el por qué es importante su solución, y el mencionar la misma de una manera general.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

El proyecto se desarrollará en el departamento de molino en DEMASA. Las actividades del departamento de molienda se enmarcan en la cocción del maíz y la adición de nutrientes al mismo, para que luego éste pase al molino en donde se procesará con el fin de transformarlo en harina.

El proceso empieza desde que el maíz llega en camiones y es almacenado en la bodega. Luego, conforme se va necesitando, es llevado a los separadores de impurezas mediante una banda transportadora, los cuales, mediante diferentes tamaños de cedazos, separan las basuras y el maíz quebrado del entero.

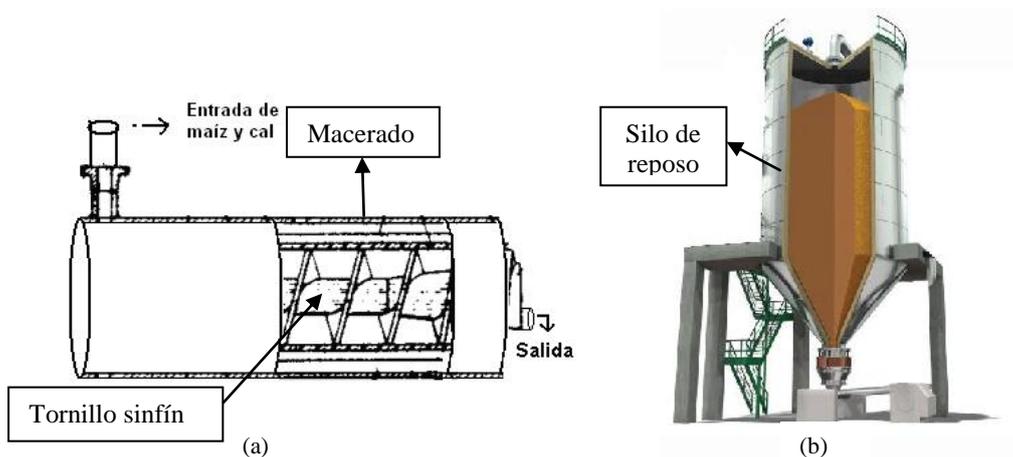


Figura 1.1 Macerador y silo de reposo

Después de esto, el maíz está listo para empezar su proceso de cocimiento y molienda. Esto se puede dividir en 3 etapas: la primera es la que se realiza en el macerador, el cual tiene un tornillo sinfín como el que se muestra en la *Figura 1.1* (a). A esta máquina se le suministra maíz y cal en proporciones definidas, se le agrega también

agua y calor mediante vapor para completar el proceso de cocción. El maíz debe tener el porcentaje de humedad necesario al finalizar esta etapa. Luego, pasa a la segunda etapa en el silo de reposo, mostrado en la *Figura 1.1* (b). En éste, el maíz debe de tener siempre un nivel constante durante cierto tiempo para finalizar el proceso de cocción. En la tercera y última etapa el maíz se muele y se transforma en harina, la cual se almacena en forma inmediata. Actualmente se pueden procesar alrededor de 100Kg de maíz por minuto. En la *Figura 1.2* se muestra un diagrama de bloques general del sistema. Este proceso se describe de manera más detallada en el capítulo 3 en la sección *3.1 Descripción del proceso a mejorar*.

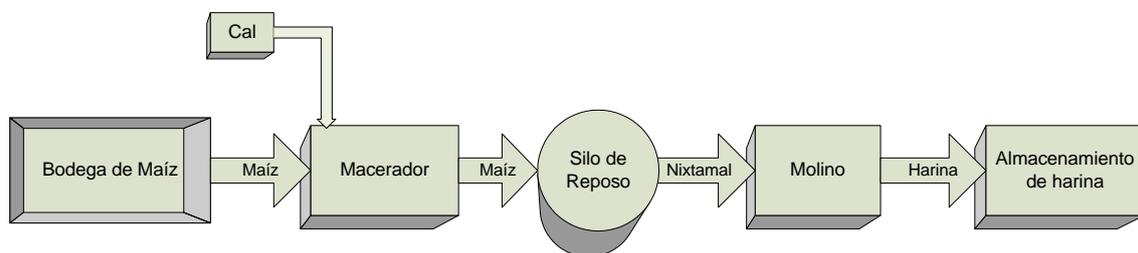


Figura 1.2 Diagrama de bloques general del sistema

El problema que se presenta en la empresa se debe principalmente al poco control y descentralización de las variables presentes en el proceso descrito anteriormente. Esto provoca una reducción en la calidad del cocimiento y molienda del maíz, además de posibles errores a la hora de transportar la harina en la última etapa.

Durante el cocimiento del maíz en el macerador, la dosificación de cal se realiza por medio de un proceso mecánico no automatizado, en el que el operador debe de conocer la cantidad de maíz que está ingresando al macerador, para así ajustar la cantidad de cal que se le suministra. Se debe mantener siempre una relación específica que va de los tres a cinco kilogramos de cal por tonelada de maíz, dependiendo del producto final deseado. Esta dosificación es de vital importancia pues de ella depende que el maíz se cocine de manera uniforme, por lo que, un error del operador en la dosificación, causa que la harina no tenga el rendimiento requerido.

En la siguiente etapa de cocimiento del maíz se debe de monitorizar constantemente el nivel del silo de reposo, pues este nivel equivale al tiempo de reposo del maíz, el cual define el tipo de harina que se va a producir. Como el silo mide 8 metros de alto, ocupa dos pisos de la planta, por lo que el personal encargado de monitorizar la altura de maíz dentro de éste, debe corroborar visualmente esta altura por medio de dos ventanas que posee el silo (*Figura 1.3*). Si se da un mal monitoreo y se permite una disminución o un aumento del nivel del maíz requerido en ese momento, la harina no podrá ser utilizada y deberá reprocesarse o combinarse con alguna otra. La medición hecha en forma visual, representa una enorme incertidumbre pues es muy subjetiva.

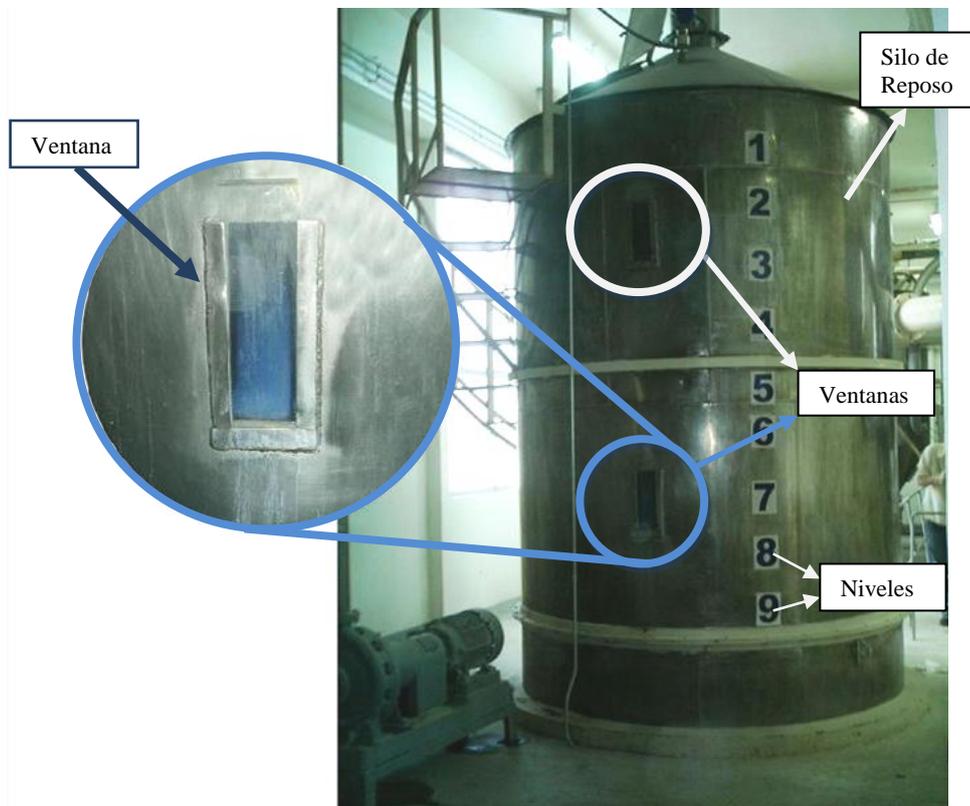


Figura 1.3 Parte superior silo de reposo - Segundo piso de la planta

Luego de estar en el silo de reposo, el maíz resultante llamado “nixtamal”, es llevado mediante una banda transportadora llamada banda nixtamal a la última etapa, donde se muele y se convierte en harina la cual se almacena de inmediato en diferentes sitios dependiendo de sus características. Ésta puede ser llevada a las tolvas 1 y 2 a las cuales poseen una capacidad máxima de 30 toneladas, a las tolvas 3 y 4 de 50 toneladas, a los silos de lona que son 5 de 30 toneladas cada uno, a la tolva de almacenamiento de

harina para frituras, al remoedor o a la báscula de tortillas. La harina que se direcciona puede provenir del molino principal, de reproceso o de las tolvas 3 y 4, dependiendo del destino de la misma.

Este sistema de flujo de harina es controlado mediante ocho válvulas neumáticas de una entrada y dos salidas que, mediante el cambio de posición de un pistón cambian la dirección de la harina. El problema que se presenta es que estas válvulas se encuentran distribuidas por toda la planta y sólo dos de ellas se pueden controlar desde una consola. Las demás deben ser accionadas por medio de una manguera de aire comprimido. Estas válvulas tienen otra dificultad: no poseen señal de confirmación de posición, por lo que si existe algún problema en el cambio de estado de alguna válvula, el personal de operación no se da cuenta. Esto causa tuberías obstruidas y en el peor de los casos el proceso se detiene.

1.2 Solución seleccionada

La solución dada a este proyecto se basa, principalmente, en crear un sistema de control y monitorizado de las variables involucradas en los procesos mencionados anteriormente. Para esto se utilizará un Controlador Lógico Programable (PLC) Allen Bradley SLC 5/05 y una pantalla táctil Panel View Plus 1000, la cual constituye la HMI o interfaz usuario máquina por sus siglas en inglés.

Dentro de lo que se pretende implementar, desde la pantalla táctil está el control de la velocidad del motor del macerador, la velocidad del tornillo sinfín del maíz encargado de llevar el maíz al macerador, del dosificador de cal, de la cernedora a la retentora 1 y de la banda nixtamal, los cuales serán controlados por medio de variadores de frecuencia. Las variables de control se conectan al PLC¹, en el que se ha diseñado un programa que controle el dosificador de cal de manera automática, para que la velocidad de éste varíe en relación con la cantidad de maíz que ingresa al macerador.

¹ Ver apéndice A.1.2

Para monitorizar el nivel del silo de reposo se instala un sensor para medir, en tiempo real, la altura del maíz dentro del mismo, el cual debe soportar las condiciones presentes en su interior como lo son la temperatura, humedad y lo abrasivo de la mezcla de maíz y cal. Así queda automatizada la medición del nivel de maíz del silo y la probabilidad de error en esta lectura se reduce totalmente, si se parte de que el sensor actúa correctamente.

También, se deben conectar las señales de control de las válvulas neumáticas encargadas del direccionamiento de la harina al PLC, para su debido control. A la vez, se debe instalar una señal de confirma de cada una de estas válvulas con el fin de asegurar el funcionamiento correcto de las mismas. Para esto, se ha diseñado un programa con el cual se controla el direccionamiento de la harina.

Como parte de las necesidades de la planta, se deben monitorizar las presiones de agua, aire y vapor desde la pantalla táctil, por lo que se definieron e instalaron los sensores de presión adecuados para el sistema. En la *Figura 1.4* se muestra el diagrama de bloques de hardware del proyecto.

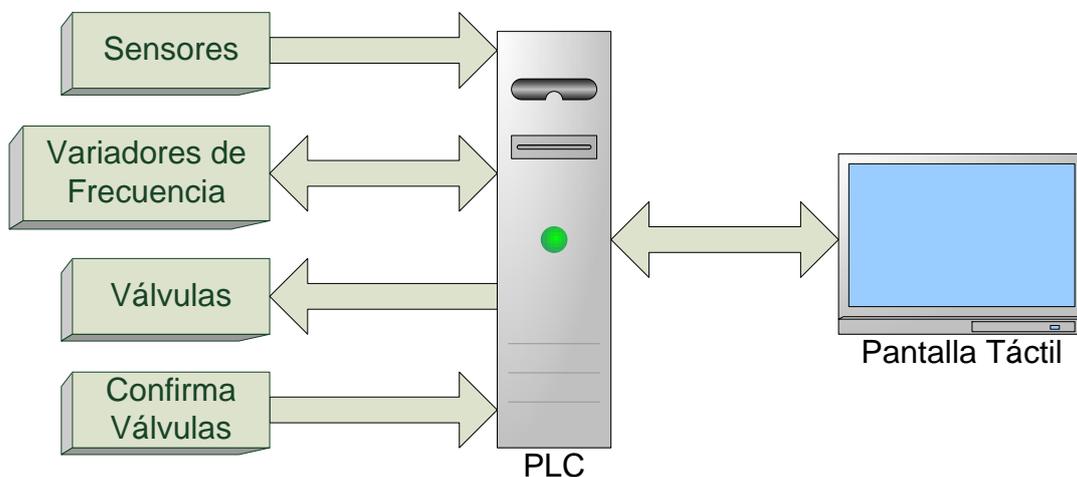


Figura 1.4 Diagrama de bloques general de hardware del proyecto

Capítulo 2: Meta y objetivos

2.1 Meta

Lograr mediante esta primera etapa de automatización, una mejora significativa en la estabilidad de la calidad de la harina producida.

2.2 Objetivo general

Diseñar una primera etapa de automatización del proceso de cocimiento y molienda del maíz para el molino de DEMASA, mediante un sistema que centralice el monitorizado y control de la mayoría de los procesos de la planta.

2.3 Objetivos específicos

2.3.1 Hardware

- Definir e instalar el PLC y los módulos de entradas y salidas por utilizar.
- Instalar válvulas solenoides para el control del direccionamiento de la harina de forma eléctrica.
- Definir e instalar un sistema para confirmar la acción de cada válvula.
- Definir e instalar el sensor de medición de nivel que mejor se adecue al silo de reposo.
- Definir e instalar los sensores de presión de agua, vapor y aire por utilizar.
- Definir e instalar la pantalla táctil a utilizar.

2.3.2 Software

- Diseñar un programa por medio del cual se controle el encendido, apagado y la velocidad de los motores mencionados anteriormente.
- Diseñar un programa que automatice la dosificación de cal al macerador.

- Diseñar un programa para el monitoreo del nivel del silo de reposo en tiempo real.
- Diseñar un programa para el monitoreo de las presiones de agua, aire y vapor.
- Desarrollar un programa para el control del direccionamiento de la harina.
- Diseñar el programa de la pantalla táctil que sirve como interfaz entre el usuario y el PLC, mediante el cual se controla y monitorea el proceso.

2.3.3 Documentación

- Realizar el manual de usuario para la utilización del programa.
- Elaborar los planos de conexión de las señales al PLC.

2.3.4 Implementación

- Definir la distribución de los equipos en el gabinete del PLC
- Configurar los variadores de frecuencia para que estos sean controlados, en modo remoto, desde el PLC.
- Definir el gabinete y lugar de instalación de la pantalla táctil.
- Realizar el cableado y entubado eléctrico de válvulas, sensores, motores y voltajes de alimentación que se encuentran en diferentes partes de la planta y que deben ser llevados al PLC.
- Realizar la correcta calibración de los sensores.
- Poner en marcha y revisar el sistema diseñado.

Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Descripción del proceso por mejorar

El proceso por mejorar con este proyecto es el cocimiento y molienda del maíz. Este se inicia con la llegada y almacenamiento de éste en la bodega, con una capacidad para catorce mil toneladas. Luego, mediante una banda transportadora se lleva a los separadores de impurezas encargados de separar las basuras y el maíz quebrado del entero. Posteriormente se inicia el proceso de cocimiento y molienda que se divide en tres etapas principales.

La primera etapa inicia con el ingreso de cierta cantidad de gramos de cal al macerador (*Figura 3.1*), proporcional a los kilogramos de maíz por minuto que también están ingresando al mismo. Luego, dentro del macerador con agua y vapor se empieza a cocinar el maíz. En este proceso la cal ayuda a que el maíz se cocine de forma uniforme. Tanto el maíz como la cal son transportados al macerador, por medio de un tornillo sinfín.

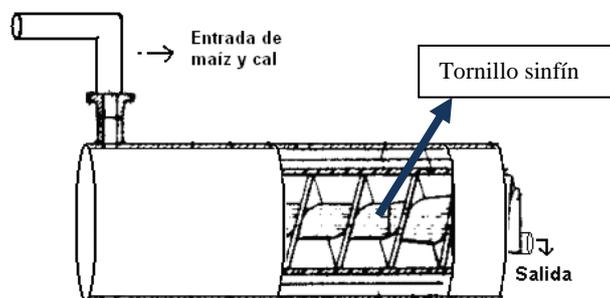


Figura 3.1 Macerador

Este período tarda de 25 hasta 35 minutos. Luego, por medio de transporte neumático, el maíz pasa a un nuevo proceso de lavado y separación de impurezas. Después pasa al silo de reposo (*Figura 3.2*) donde se realiza la segunda etapa de cocimiento.

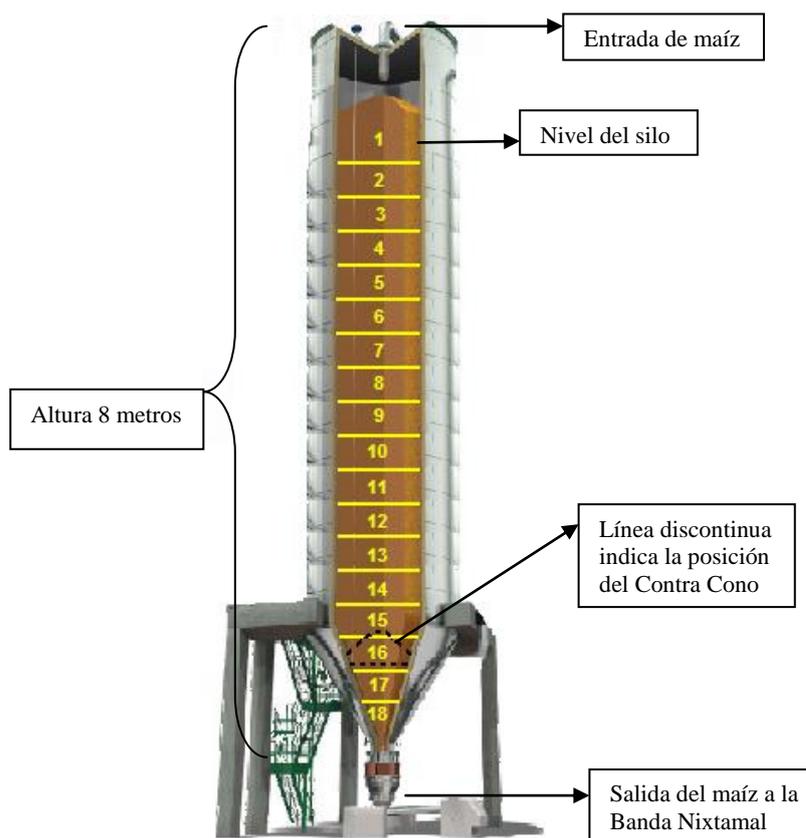


Figura 3.2 Silo de reposo

La segunda etapa de cocción se desarrolla a través del tiempo de reposo o retención del maíz en el silo (*Figura 3.2*). Éste es equivalente al nivel en que se encuentre el maíz. Por ejemplo, al producir harina para productos de la Tosty, éste debe permanecer alrededor de 30 minutos en el silo. Esto equivale a mantenerlo en el nivel 14 de manera constante, mientras que para otros productos debe tener 2 horas y 20 minutos de reposo que sería igual a mantenerlo en el nivel 4 del silo. Esto, independientemente de cuánto maíz esté saliendo.

Después de estas dos etapas en las que se cocina el maíz, dicho producto pasa por medio de una banda transportadora llamada banda Nixtamal a la última etapa, la cual se produce en el molino. En ella se muele mediante unos martillos, transformándolo en harina, para luego transportarla a las tolvas donde se almacena. Este almacenamiento se logra con el traslado del producto por medio de varias tuberías que direccionan la harina empleando un transporte neumático. En la *Figura 3.3* se muestre el diagrama general del proceso por el cual pasa el maíz para terminar en harina.

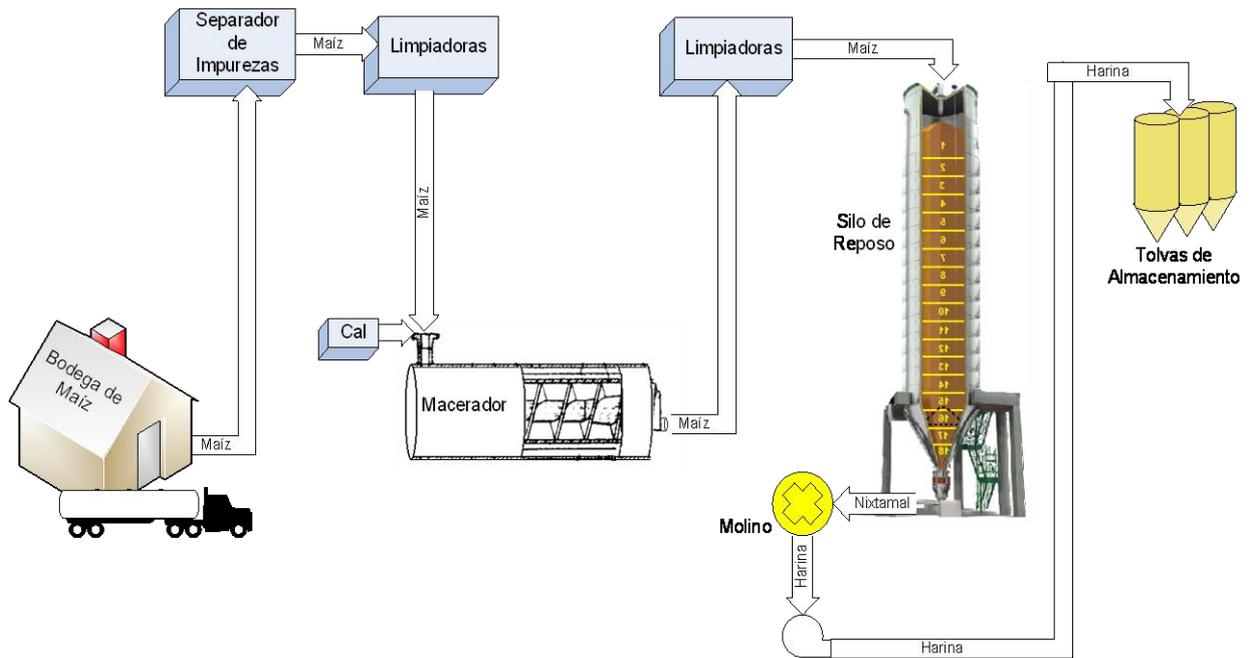


Figura 3.3 Diagrama general del proceso del maíz

Por su naturaleza, la mayor parte de las actividades efectuadas por este departamento se realizan dentro del plantel, en él se encuentra la maquinaria dedicada al cocimiento y molienda del maíz.

3.2 Antecedentes bibliográficos

3.2.1 Descripción PLC (Controlador Lógico Programable)

El PLC que se utilizó fue el SLC 500 de tipo modular de la marca Allen Bradley, el cual ya estaba definido por parte de la empresa, y está compuesto por los módulos que se muestran en la *tabla 3.1*.

Luego de esta tabla se mencionan las características relevantes del procesador a utilizar.

Tabla 3.1 Módulos que conforman el PLC

Cantidad	Módulo	Nº de Catálogo	Descripción
1	Procesador SLC 5/05	1747-L553C	Procesador con puerto Ethernet y RS232, con 64Kbytes de memoria
5	Entradas discretas	1746-IA16	Cada tarjeta con 16 entradas
5	Salidas discretas	1746-OW16	Cada tarjeta con 16 salidas
3	Salidas analógicas	1746-NO4I	Cada tarjeta con 4 salidas
2	Entradas analógicas	1746-NI8	Cada tarjeta con 8 entradas
1	Fuente de Poder	1746-P4	Con fuente de poder de 24V
2	Chasis	1746-A13	Con 13 ranuras para conexión de módulos

Procesador SLC 5/05 (Nº de catálogo 1747-L553C)

- Tamaños de memoria de programación 64 K.
- Rendimiento de alta velocidad: 0.90 ms/K es lo típico.
- Control de hasta 4096 puntos de entrada y salida.
- Programación en línea (incluye edición en tiempo de ejecución).
- Canal Ethernet 10Base-T incorporado, que acepta:
 - Comunicación de alta velocidad entre computadoras mediante TCP/ IP
 - SNMP para administración de redes Ethernet estándar
 - BOOTP para asignación dinámica opcional de direcciones IP
- Canal RS-232 incorporado que acepta full-duplex DF1, maestro/esclavo half-duplex DF1 para SCADA.
- Reloj/calendario en tiempo real incorporado.
- Interrupción temporizada seleccionable (STI) de 1 ms.
- Interrupción de entrada discreta (DII) de 0.50 ms.
- Funciones matemáticas avanzadas: trigonométricas, PID, exponenciales, punto flotante (coma flotante) y las instrucciones de cálculo.
- Direccionamiento indirecto.

- El PROM de la memoria flash proporciona actualizaciones de firmware sin cambiar EPROMS físicamente.
- Módulo de memoria flash EPROM opcional disponible.
- Interruptor de llave: RUN, REMote, PROGram (borrado de fallos).
- RAM con batería de respaldo.

[1]

3.3 Descripción de los principales principios electrónicos relacionados con la solución del problema

3.3.1 Señal 4-20mA

La mayoría de los instrumentos de medición industriales, transmiten la información mediante un lazo de corriente de 4-20mA. Este es un estándar muy utilizado. Al contrario de una señal de tensión que presenta una caída de su magnitud en el cable que aumenta con la distancia, la de corriente es la misma en cualquier punto del circuito. Relativamente es una señal analógica de alta potencia que puede ser usada en circuitos de medición a larga distancia.

Esta señal de corriente, puede ser convertida a tensión con propósito de medición en cualquier punto del circuito, si se añade una resistencia en serie. La caída de tensión alrededor de la resistencia, varía proporcional a la corriente. Por ejemplo, para una resistencia de 250 Ohm se producirá una tensión de 1V a 5V con un lazo de corriente de 4-20mA. El circuito que ilustra este ejemplo, se muestra en la *Figura 3.4*.

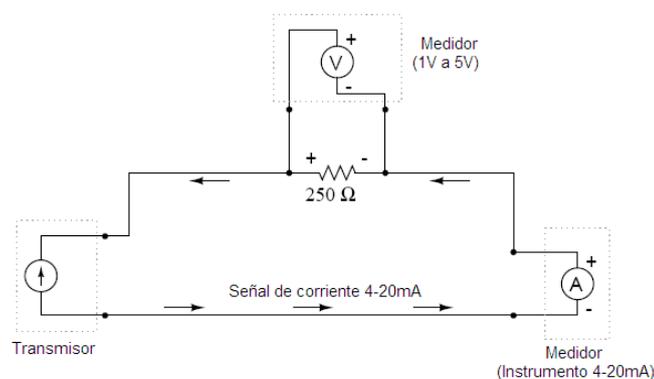


Figura 3.4 Circuito señal 4-20mA a una señal 1-5V

3.3.2 Protocolos de comunicación utilizados

3.3.2.1 HART

El protocolo HART permite la comunicación bidireccional con dispositivos inteligentes, sin perturbar la señal 4-20mA. Su implementación es fácil y las ventajas que brinda han hecho que este protocolo tenga gran aceptación en el sector industrial.

Este protocolo se basa en el estándar Bell 202 FSK (codificación por cambio de frecuencia), con el que se superpone la señal digital HART a la analógica 4-20mA, como se muestra en la *Figura 3.5*.

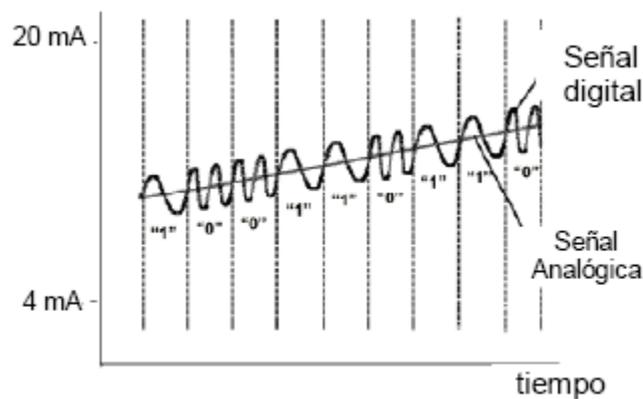


Figura 3.5 Comunicación digital HART superpuesta en la señal analógica 4-20mA. [8]

La información binaria es representada mediante dos frecuencias, en las que un cero lógico es representado por una frecuencia de 2.2KHz, mientras que uno lógico por una de 1.2KHz. Al ser esta señal una AC y su valor promedio es cero, la señal continua no es afectada.

El protocolo HART permite comunicación digital en los dos sentidos (lectura-escritura), por lo que es posible que con éste se pueda acceder a parámetros de proceso, configuración de instrumentos, calibración e información de diagnóstico. Todo esto por el mismo cable en que viaja la señal analógica.

Esta tecnología HART está basada en comandos. Existen tres tipos de comandos que proporcionan acceso lectura-escritura con los instrumentos de campo que son

compatibles. Los comandos pueden ser: comandos universales, comandos de práctica común y comandos específicos del dispositivo.

- Los comandos universales aseguran la interoperabilidad entre los productos de distintos fabricantes, y proporcionan el acceso a la información útil en la operación habitual en planta. Todos los esclavos compatibles HART deben responder a todos los comandos universales.
- Los comandos de práctica común proporcionan acceso a funciones que son implementadas en muchos dispositivos, pero no en todos. Son opcionales, pero si se implementan, debe ser como se especifica.
- Los comandos específicos del dispositivo ofrecen la libertad para que cada aparato particular tenga parámetros o funciones exclusivos. [8]

3.3.2.2 RS-232

El protocolo RS-232 es una norma o estándar mundial que rige los parámetros de uno de los modos de comunicación serial. Por medio de éste se estandarizan las velocidades de transferencia de datos, la forma de control que utiliza dicha transferencia, los niveles de voltajes utilizados, el tipo de cable permitido, las distancias entre equipos, los conectores, etc. Además de las líneas de transmisión (Tx) y recepción (Rx), las comunicaciones seriales poseen otras líneas de control de flujo. Su uso es opcional, depende del dispositivo a conectar.

A nivel de software, la configuración principal que se debe dar a una conexión a través de puertos seriales. RS-232 es básicamente la selección de la velocidad en baudios (1200, 2400, 4800, etc.); la verificación de datos o paridad (paridad par o paridad impar o sin paridad), los bits de parada luego de cada dato (1 ó 2); y la cantidad de bits por dato (7 ó 8), utilizado para cada símbolo o carácter enviado.

La Norma RS-232 fue definida para conectar un ordenador a un modem. Además de transmitirse los datos de una forma serie asíncrona, es necesaria una serie de señales adicionales, que se define en la norma. Las tensiones empleadas están comprendidas entre +15/-15 voltios. [6]

3.3.2.3 Ethernet

Es la tecnología de red de área local más extendida en la actualidad. Esta tecnología fue estandarizada por la IEEE en 1983 debido a su gran difusión, bajo el nombre de Ethernet 802.3.

Algunas de las características básicas del Ethernet son:

- En configuraciones habituales la velocidad de transmisión de datos es de 10Mbits/s y puede llegar a 100Mbits/s en especificaciones Fast Ethernet.
- Como medio físico de transmisión, actualmente depende del estándar por usar se puede usar cable de par trenzado (10 Base-T, utilizado en este proyecto), fibra óptica (10 Base-FL) y las conexiones a 100Mbits/s (100 Base-X o Fast Ethernet). La especificación actual se llama IEEE 802.3u
- La información se transmite por medio del sistema CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, Detección de Portadora con Acceso Múltiple y Detección de Colisiones*), cuyo principio de funcionamiento consiste en que una estación, para transmitir, debe detectar la presencia de una señal portadora y, si existe, comienza a transmitir. Si dos estaciones empiezan a transmitir al mismo tiempo, se produce una colisión y ambas deben repetir la transmisión, para lo cual esperan un tiempo aleatorio antes de repetir. Así se evita de este modo una nueva colisión, ya que ambas escogerán un tiempo de espera distinto. Este proceso se repite hasta que se reciba confirmación de que la información ha llegado a su destino. [13]

3.3.3 Variador de frecuencia (VDF)

Un variador de frecuencia, es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna (comúnmente trifásico) por medio de la variación de la frecuencia de la señal que alimenta el motor.

Los variadores funcionan bajo el principio de que la velocidad de un motor síncrono CA (n) está determinada por la frecuencia CA de alimentación (f) y el número de polos en el estator (p), como se muestra en la ecuación 1.

$$n = \frac{120 * f}{p} \quad (\text{RPM}) \quad (1)$$

El variador de frecuencia convierte la frecuencia de la señal entrante por medio de un circuito que contiene 3 etapas principales. En la primera, se rectifica la señal trifásica AC de entrada; en la segunda, se transforma en una DC por medio de capacitores y en la última etapa la señal es convertida en una señal quasi-senoidal de AC al usar un circuito inversor conmutado. Estas tres etapas son mostradas en la *Figura 3.6*. [4]

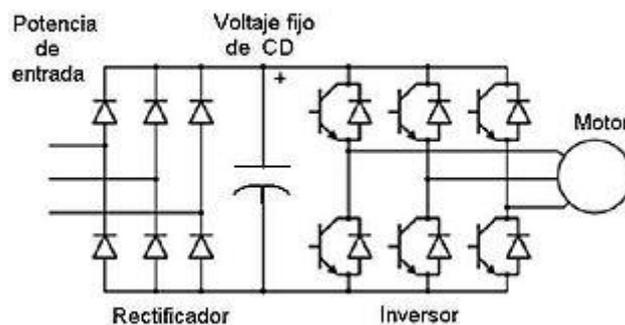


Figura 3.6 Diagrama del variador de frecuencia.

Algunas de las ventajas de utilizar variadores de frecuencia para el control de motores se muestran a continuación:

- Mantener una velocidad fija sin importar la variación de carga del sistema
- Arranque progresivo: El arranque se produce siguiendo una rampa que evita la brusca aceleración de los elementos mecánicos acoplados al motor.
- Eliminación de golpes de torque: Las rampas de aceleración y desaceleración permiten maniobras de arranque y parada progresiva.
- Alargamiento de la vida útil de los equipos.
- Funcionamiento de protección y vigilancia: sobreintensidades, sobretensiones o bajas tensiones, sobrecalentamientos, con indicación de alarma a distancia, etc.

- Electrónicos: La electrónica de potencia no tiene partes móviles, lo cual aumenta la fiabilidad y reduce el mantenimiento.
- Ahorro: El variador de frecuencia es la herramienta adecuada para conseguir el ahorro de energía, la reducción de los ruidos y los problemas de funcionamiento de una instalación.

3.3.4 Tornillo sinfín

Los transportadores de tornillo o gusano sinfín son un sistema capaz de mover materiales a granel, prácticamente en cualquier dirección. Proporcionan variedad de opciones para su manejo de manera eficaz y confiable. En la *Figura 3.7* se muestra una sección de un tornillo sinfín. Esto para ejemplificar su estructura física.

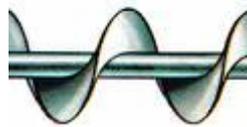


Figura 3.7 Sección de un tornillo sinfín

3.3.5 Válvula solenoide

Las válvulas solenoides permiten un control ON-OFF de fluidos por medio de variaciones eléctricas en su bobina. Son utilizadas ampliamente en control de flujo de sistemas neumáticos.

En los procesos de la industria, en la mayoría de ocasiones es necesario controlar algún tipo de flujo (gases, líquidos). Esto es realizado mediante válvulas, en particular las que son activadas por solenoides son de gran aplicación, pues facilitan el control de la misma en lugares de difícil acceso, al ser activadas eléctricamente.

Esta válvula es controlada variando la corriente alterna que pasa por la bobina del solenoide. Esta corriente produce un campo magnético que atrae un émbolo móvil. Esto puede tener varias aplicaciones, una de ellas es permitir o no, algún tipo de flujo, o también puede permitir que el flujo pase constantemente, pero cambiar el lugar de destino del mismo.

3.3.6 Micro switch

Es un interruptor eléctrico que se abre o cierra al ser activado por una pequeña fuerza física. Son utilizados ampliamente para limitar carreras o desplazamientos de elementos mecánicos. Su función está determinada por medio de un contacto eléctrico, mismo que puede ser empleado para el control de diferentes procesos, de gran durabilidad.

3.3.7 Interruptor de nivel de paleta rotativa

Se usa para el control del nivel de silos y tolvas, con el propósito de evitar rebalses del producto que contienen. Es un motor de bajo torque, aproximado a una revolución por minuto, el cual hace girar una paleta, la que al ser frenada por el material, actúa sobre un interruptor que envía una señal.

Capítulo 4: Procedimiento metodológico

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para llegar a la solución seleccionada, describiendo las etapas seguidas para alcanzar la misma, basadas en el método de diseño de ingeniería.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

El gerente de mantenimiento del departamento de molino en DEMASA percibió que en las líneas de producción se estaban dando problemas técnicos durante el proceso. Estos fueron atribuidos a la descentralización y poco control que había de las variables que conforman el proceso en general, lo que causó problemas en los tiempos y calidad del producto final.

Durante el análisis para buscar la mejor solución al problema, se decidió que ésta se basaba en la automatización del proceso mediante un PLC para el control y monitorizado de las variables existentes y nuevas variables por integrar. El PLC por utilizar por la empresa se definió con anterioridad, tomando en cuenta su compatibilidad con sistemas existentes. Luego, se procedió a entrevistar a los encargados de las líneas de proceso y a los técnicos que le brindan el mantenimiento a las máquinas, con el fin de recopilar información para definir cuáles serían los alcances y prioridades del proyecto por desarrollar.

El gerente de mantenimiento solicitó también, que los nuevos equipos por adquirir para la realización del proceso de automatización fueran de empresas reconocidas que den soporte en Costa Rica, con la garantía y respaldo del funcionamiento de los mismos.

4.2 Obtención y análisis de información

Como primer paso, antes de analizar cualquier posible solución a los problemas presentes, se procedió a conocer de manera más profunda el proceso del maíz en la planta enfocándose en los subprocesos por mejorar.

Una vez hechas las entrevistas se procedió a recopilar información que ayudara a definir cuáles equipos utilizar en el diseño del hardware, entre estos estaban sensores, variadores de frecuencia, switch Ethernet, válvulas solenoides, reactores de línea, fuentes de poder, módulos de entradas y salidas para el PLC, una pantalla táctil y demás.

Se recopiló también la información del PLC, sus características físicas, el software utilizado para su programación; los respectivos manuales para su correcta instalación y también los diferentes manuales con las instrucciones y la manera en que se programa.

Dentro de los métodos para evaluar la información preliminar, destaca el análisis de costos, pues el proyecto se sujeta a un presupuesto definido. Los materiales por adquirir se dividieron según su tipo y se hicieron diferentes cotizaciones a proveedores reconocidos, con el fin de analizar cuál brindaba la mejor propuesta.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Una vez analizada la información obtenida se procedió a plantear una posible solución para cada uno de los procesos que se pretendían automatizar, con la idea de exponerlo al gerente y determinar si el enfoque que se le estaba dando al proyecto iba de la mano con las características deseadas por la empresa.

El diseño del proyecto tendría como unidad central de proceso el PLC SLC 500 de la marca Allen Bradley , con un CPU SLC 5/05. Sus características ya mostradas en la sección 3.2.1 cumplían a cabalidad con las cualidades necesarias para este proyecto. Al ser este PLC modular, tiene la capacidad de trabajar con racks de 5, 7, 10, 13 y 15

slots, para los diferentes módulos de entradas y salidas discretas y analógicas por utilizar, además de dar la posibilidad de conectar varios racks entre sí.

Observando las características del silo de reposo ya mencionado anteriormente, se pensaron en varias opciones para medir su nivel, de las cuales se analizaron 3 profundamente. Estas fueron: un sensor ultrasónico, un sensor de radar y un sensor de radar de onda guiada. Su funcionamiento se describe a continuación.

El sensor ultrasónico funciona básicamente enviando ondas de sonido. Este sensor emite cíclicamente un impulso de corta duración y alta frecuencia, que se propaga a la velocidad del sonido por el aire. Este impulso es enviado por un transmisor, viaja por el aire y rebota en el material o determinado objeto, esta reflexión es captada por un receptor que hace el cálculo de la distancia mediante el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la señal, de acuerdo con la ecuación 2. En la *Figura 4.1* se ilustra el funcionamiento del sensor.

$$D = \frac{v * t}{2} \quad (2)$$

D: distancia del transmisor (superficie del producto).

v: velocidad del sonido.

t: tiempo entre la emisión y la recepción.

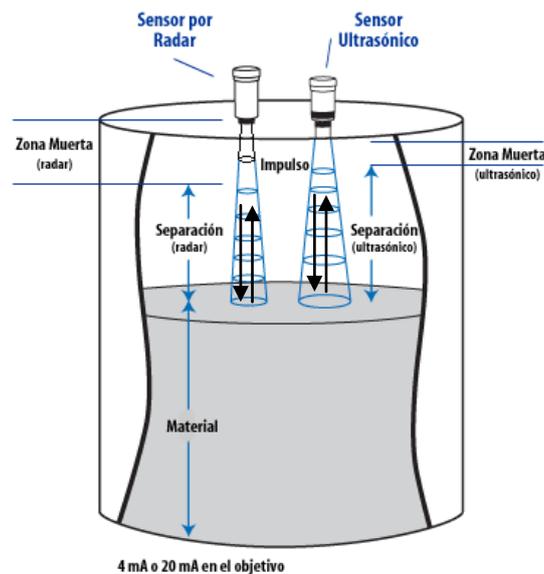


Figura 4.1 Sensor de radar y sensor ultrasónico

El sensor de radar mide el tiempo de retorno de un impulso de microondas que permite medir el nivel de un tanque o silo. Este sensor mediante una antena o antena de trompeta emite y recibe los impulsos de microondas. Esta antena transmite impulsos cortos de microondas de alrededor de 0.8ns de duración hacia el producto. Estos se reflejan al chocar contra la superficie, devolviéndose a la antena, la cual funciona ahora como receptor. En la *Figura 4.1* se ilustra el funcionamiento de este sensor. La distancia a la cual se encuentra el producto es proporcional al tiempo de retorno del impulso de microondas:

$$D = \frac{c*t}{2} \quad (3)$$

D: distancia del transmisor (superficie del producto)

c: velocidad de la luz

t: tiempo de tránsito en segundos

Un aspecto de vital importancia, es que la medición de niveles con este tipo de sensores es virtualmente independiente de la temperatura, de altas presiones o vacío, de presencia de polvo, además de no verse afectado por la presencia de vapor.

El sensor de radar de onda guiada aprovecha el principio de medición de niveles por microondas guiadas, o TDR (Time Domain Reflectometry, reflectometría en el dominio del tiempo) que la industria de telecomunicaciones desarrolló. Este sensor funciona casi con el mismo principio que el sensor de radar mencionado anteriormente, solo que en éste, las microondas viajan por un cable. La tecnología TDR usa microimpulsos electromagnéticos que viajan por cable (ondas guiadas) y se reflejan debido a un cambio súbito en la constante dieléctrica del material. La medición de la distancia a la que está el producto en el silo se realiza igualmente con la ecuación 3.

Este tipo de medición tiene la ventaja de que no se ve afectada por la humedad, por cambios en la composición, por la presión o la temperatura. La presencia de grandes cantidades de polvo, adherencias, vapor, ruido acústico o el ángulo de talud del producto tampoco afectan a la medición. Una ilustración de la instalación de este sensor se observa en la *Figura 4.2*.

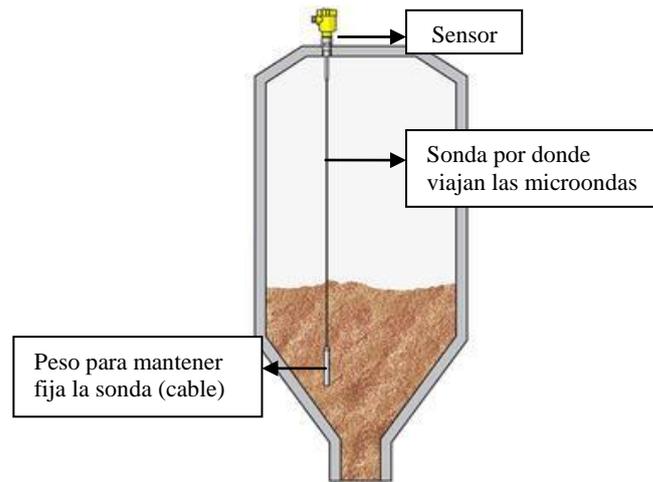


Figura 4.2 Sensor de radar de onda guiada

Luego de obtener las características de estos tres sensores y analizarlas junto con las del silo de reposo, se determinó escoger el sensor de radar de onda guiada por las ventajas que ofrece y que son explicadas en el capítulo 5.

4.4 Implementación de la solución

Luego de haber recopilado la información necesaria se inició con el diseño de las diferentes partes que conformaban el proyecto. Para esto se definieron las etapas por seguir para desarrollar el mismo. Algunas de estas se mencionan de manera general a continuación y se amplían en el capítulo 5.

- **Determinación de las variables y elementos que conforman el proceso**

Se desarrolló una lista de las variables y elementos que intervenían en el proceso por automatizar, como por ejemplo: encendido y apagado de válvulas desviadoras, variadores de frecuencia, señales analógicas, encendido y apagado de motores, señales discretas y demás.

Esta lista se realizó con el fin de buscar referencia bibliográfica (manuales, hojas de datos) en la empresa o por internet de los diferentes dispositivos por utilizar y también para ir definiendo los equipos por adquirir para la implementación del proyecto.

- **Estudio de manuales de programación y características del PLC**

Se identificaron las características del PLC SLC 500 Allen Bradley, con el fin de definir sus debilidades y fortalezas para con el proyecto. Además de esto, se estudiaron los diferentes manuales que correspondían a este PLC, entre los cuales destaca el “Juego de Instrucciones de SLC 500 y MicroLogix 1000”, el cual poseía todas aquellas que se podían utilizar con este PLC con ejemplos de programación.

Se estudió ampliamente, debido a la poca experiencia y familiarización que se tenía con el mismo, el manual del RSLogix 500 [14], que es el software de programación de este PLC. Asimismo, se estudiaron las características de los módulos por utilizar.

- **Estudio de manuales de programación y características de la pantalla táctil**

Se identificaron las características de la pantalla táctil Panel View Plus 1000 de la marca Allen Bradley, como la interfaz de usuario por utilizar. Se estudió el manual del FactoryTalk *View Machine Edition*, que es el software de programación para la pantalla, con el fin de irse familiarizando con el mismo.

- **Creación de diagramas de flujo de las diferentes etapas del proceso**

Se dividió en etapas el proceso por automatizar para llevar un mejor orden y control de lo planeado. Luego de esto se diseñaron los diagramas de flujo del programa en escalera del PLC y el del interfaz de usuario en la pantalla táctil.

- **Creación y simulación de los programas**

Luego de haber comprendido el funcionamiento de los programas por utilizar y de diseñar los diagramas de flujo, se crearon las diferentes subrutinas del programa del PLC y de las pantallas de la pantalla táctil.

Cuando la mayor parte de una subrutina estaba creada, se iba probando mediante el software RSLogix Emulated 500 que simulaba que la computadora se encontraba conectada al PLC, dando la posibilidad de descargar el programa diseñado y simular su funcionamiento. También mediante este software y otro más (el RSLinx Classic) se

podían simular las pantallas creadas en la pantalla táctil pues permitía establecer un enlace entre los dos programas (el del PLC y el de la pantalla táctil).

- **Instalación de dispositivos físicos**

Después de haber definido los dispositivos eléctricos y electrónicos por utilizar se procedió a instalar los mismo. Para esto se obtuvo ayuda de los técnicos electricistas de la empresa, para entubar y cablear las señales desde diferentes puntos de la planta y llevarlo hasta el PLC. Entre algunos de los dispositivos a instalar se encontraban los sensores de presión, el sensor de nivel, válvulas solenoides, micro switch y variadores de frecuencia.

- **Conexión de señales al PLC**

Para conectar las señales al PLC se utilizaron borneras (regletas de conexión) a las cuales llegaban los cables de control y monitoreo de los sensores, variadores de frecuencia, válvulas solenoides, micro switches y demás. Cada salida o entrada de cada módulo tiene una numeración específica, la cual se puede observar en los planos de cada uno de ellos, adjuntados en el apéndice A.3.

- **Prueba del programa diseñado**

Los programas diseñados fueron descargados y puestos a prueba en el PLC y en la pantalla táctil antes de poner en marcha el proyecto. Esto se realizó, mediante dispositivos que simulaban entradas analógicas o discretas, conectados a los módulos del PLC para ver su correcto funcionamiento. También se midieron las salidas del mismo con el fin de verificar si eran las adecuadas.

Luego de realizar estas pruebas se vio la necesidad de ajustar algunas variables comúnmente en línea, es decir con el PLC conectado, esto con el fin de volver a comprobar el funcionamiento correcto de los programas.

- **Aplicación de las diferentes etapas que componen el proyecto**

Teniendo la simulación del programa lista, y funcionando de forma correcta, se procedió entonces a aplicar las diferentes etapas que conformaban el proyecto. Esto se realizó en los días de paro de la planta, pues se necesitaban probar los programas y

dejarlos depurados. Es decir, sin errores para que pudieran ser utilizados cuando la planta entrara en funcionamiento.

- **Capacitación a operarios y técnicos eléctricos**

Se brindaron charlas a los operarios de las máquinas que se vieron afectados por los cambios hechos, con el fin de que comprendieran el nuevo método para el control y monitoreo del proceso, que se centraría en la pantalla táctil. Además, se les brindó una explicación básica del programa del PLC a los técnicos electricistas, con el fin de que estos puedan identificar alguna falla en el programa.

Para mayor facilidad, junto con las charlas, se les brindó también manuales para la utilización del programa de la pantalla, y manuales técnicos del programa y conexiones del PLC.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En esta sección se describirá primeramente, la distribución hecha de los equipos físicos en dos gabinetes; luego, los software utilizados para la programación del PLC, la pantalla táctil y los sensores. Por último, la parte más importante, en la cual se describe de manera detallada la solución selecciona tanto de hardware como de software para cada una de las etapas del proyecto, que sumadas brindan la solución final. A continuación se mencionan las mismas:

Etapas:

1. Control de variadores de frecuencia y automatización de la dosificación de cal al macerador.
2. Monitoreo del nivel del silo de reposo.
3. Monitoreo de presiones.
4. Direccionamiento de la harina.

La primera etapa está compuesta por dos puntos, ya que para realizar la automatización de la dosificación de la cal, primero se debió implementar el control de los variadores de frecuencia de la cal y del maíz.

5.1 Distribución física de los equipos

En cuanto a la parte física del proyecto se decidió realizar la mayoría de la instalación en dos gabinetes, uno para la parte de control y el otro para la parte de potencia. El exterior de estos se muestra en la *Figura 5.1*.



Figura 5.1 Gabinete de control y gabinete de potencia

En el gabinete de control se instaló el PLC con sus respectivos módulos, la fuente de alimentación, algunos relé y las borneras a las cuales llegaban las señales. La instalación de estos se muestra en la *Figura 5.2*. Por otra parte algunos módulos del PLC habían sido adquiridos de antemano por la empresa, pues se utilizarán en un proyecto posterior al que se realizó. En la *Tabla 5. 1* se muestra la distribución de estos en dos racks de 13 ranuras cada uno, los módulos utilizados en este proyecto fueron los que se encuentran en los slots 1, 2, 6, 10, 11, 12, 13 y sus planos de conexión con su respectiva numeración se muestran en el apéndice A.3.

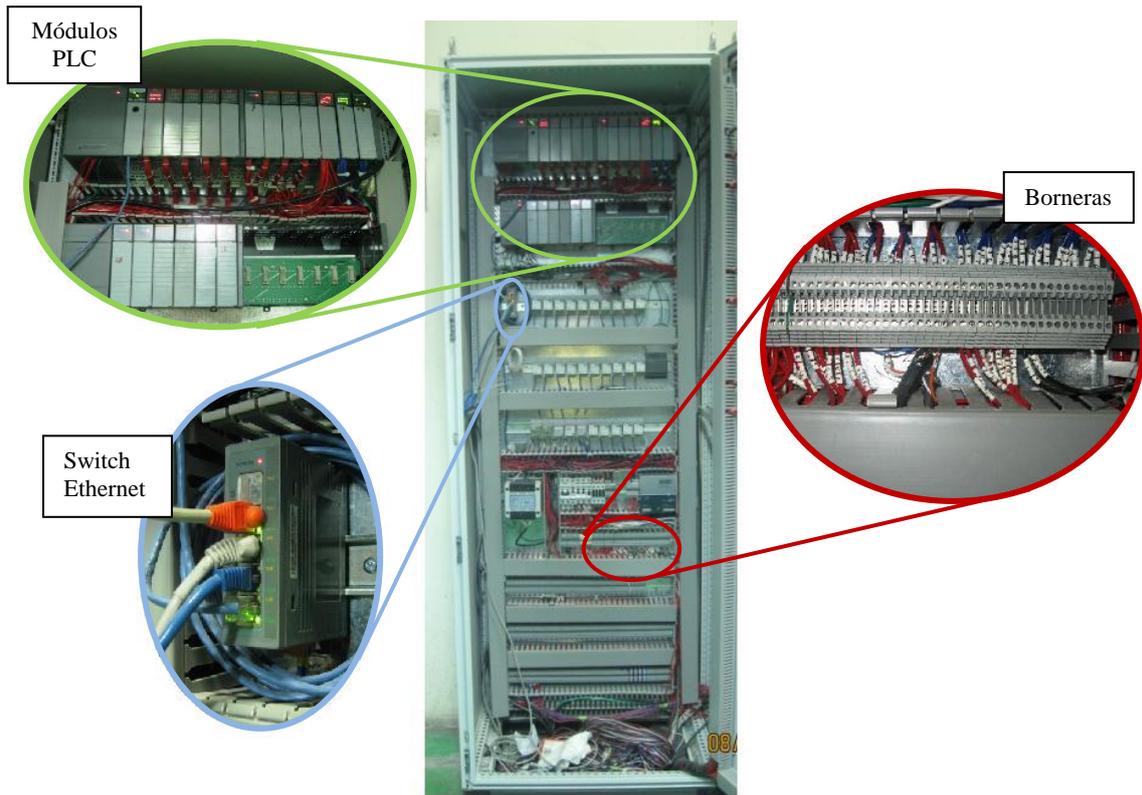


Figura 5.2 Distribución de partes en el gabinete 1

Tabla 5. 1 Ubicación de los módulos del PLC por ranuras en los dos racks de 13 ranuras

Ranura	Módulo	N° de Catálogo	Descripción
0	Procesador SLC 5/05	1747-L553C	Procesador con puerto Ethernet y RS232, con 64Kbytes de memoria
1,2,3,4,5	Entradas discretas	1746-IA16	Cada tarjeta con 16 entradas
6	Salidas analógicas	1746-NO4I	Cada tarjeta con 4 salidas
7,8,9,10	Salidas discretas	1746-OW16	Cada tarjeta con 16 salidas
11,12	Entradas analógicas	1746-NI8	Cada tarjeta con 8 entradas
13,14	Salidas analógicas	1746-NO4I	Cada tarjeta con 4 salidas
15,16	Salidas discretas	1746-OW16	Cada tarjeta con 16 salidas
17,18	Entradas analógicas	1746-NI4	Cada tarjeta con 4 entradas

Un dispositivo importante que se usó en el gabinete de control fue el Switch ICP DAS NS-205 (Figura 5.3) de Ethernet por medio del cual se realizaba la conexión en red del PLC, la pantalla táctil y la PC.



Figura 5.3 Switch Ethernet ICP DAS NS-205

En el gabinete de potencia se encuentran los variadores de frecuencia, el reactor de línea para cada fase del sistema trifásico de 440V que alimenta los variadores. También poseen un disyuntor termomagnético (breaker) para su encendido o apagado. Todos los variadores utilizados son Siemens Micromaster 420, en la *Figura 5.4* se muestra como está conformado este gabinete.

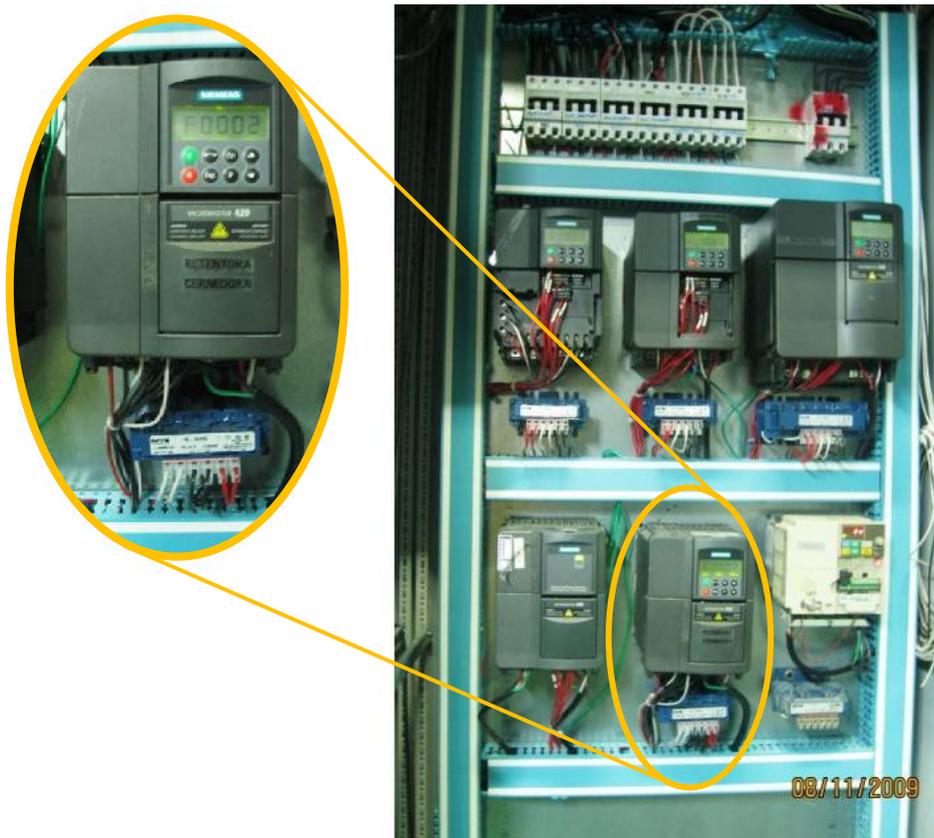


Figura 5.4 Distribución del gabinete de potencia

5.2 Descripción del software utilizado

En esta sección se dará una breve explicación del software del PLC y la pantalla táctil utilizado para desarrollar el proyecto, con el fin de mencionar su funcionamiento y características.

a. RSLogix 500

Este fue el software utilizado para la programación del PLC, está enfocado a la programación en lógica de escalera. Posee un amplio set de instrucciones [2] que comprende instrucciones de comparación, matemáticas, manejo de datos, flujo de programa, banderas, comunicación, así como instrucciones de conteo y temporalización. En la *Figura 5.5* se muestra la pantalla principal de este software.

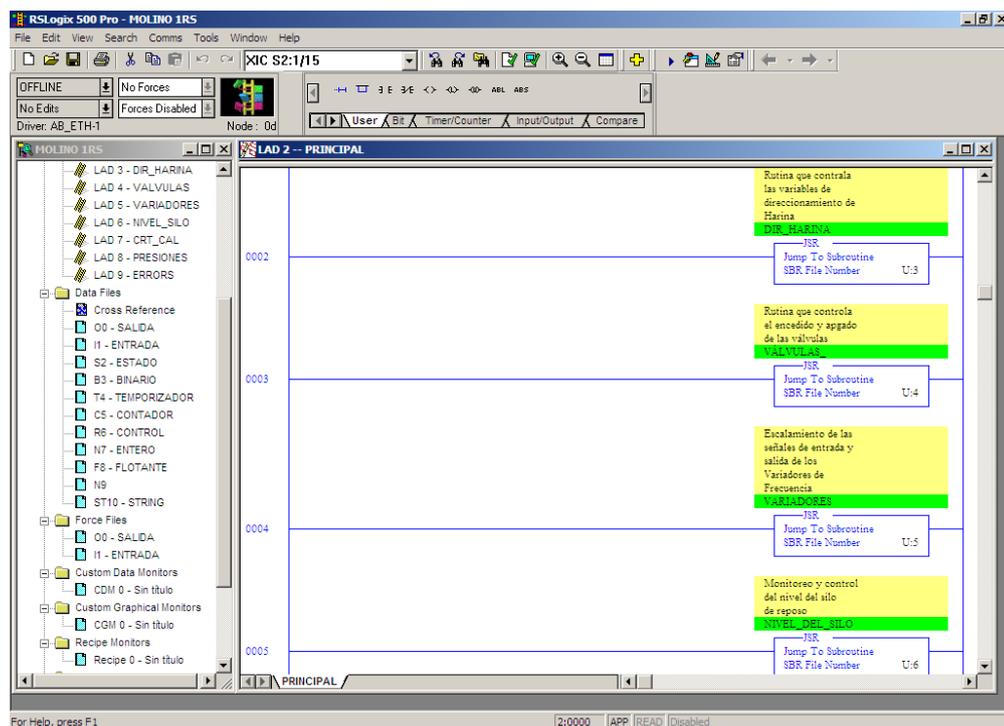


Figura 5.5 Pantalla principal del programa RSLogix 500

b. RSLinx Classic

Este programa es el encargado de realizar la conexión entre los dispositivos. No obstante, éste no interviene en las labores de programación sino que funciona como un enlazador entre la comunicación del PLC, el Panel View y la computadora. Su función comprende la administración de los distintos controladores para sustentar la

comunicación entre los diferentes elementos Allan-Bradley que pueden comprender una red.

c. FactoryTalk View Machine Edition (ME)

Este es un software HMI² de nivel de máquina compatible con la “Arquitectura Integrada de Rockwell Automation”. Es parte de los sistemas de soluciones de monitoreo y control diseñadas para abarcar desde aplicaciones autónomas, a nivel de máquina hasta aplicaciones a nivel supervisor de múltiples servidores, múltiples clientes y HMI de usuarios múltiples.

En este proyecto, este software fue el que se implementó para la creación de las pantallas de monitoreo y control de las diferentes etapas ya mencionadas, en una Panel View Plus 1000. En la *Figura 5.6* se presenta la pantalla principal de este programa.

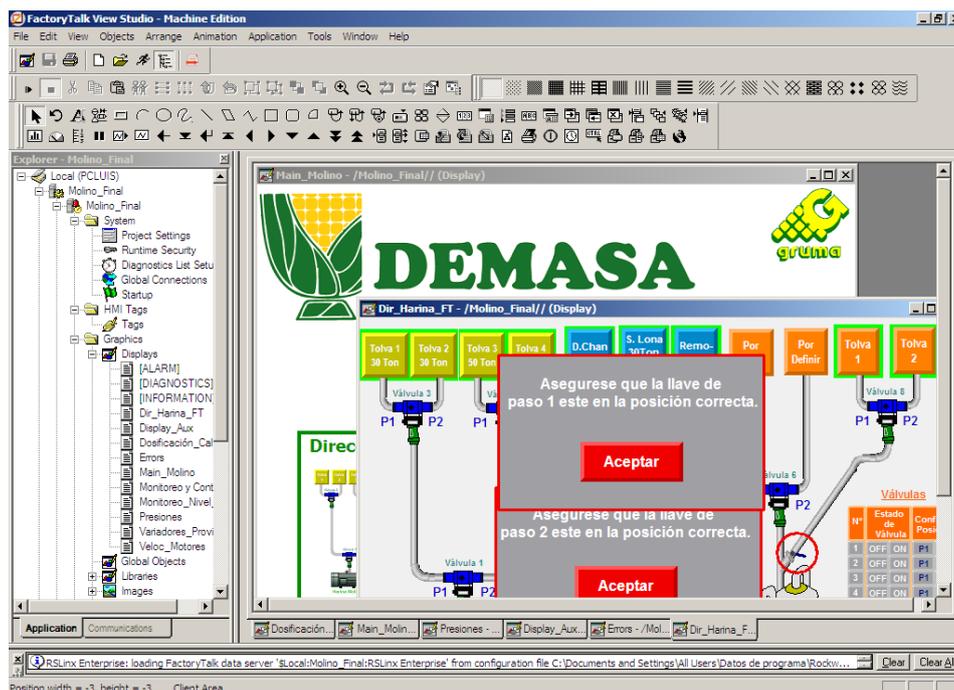


Figura 5.6 Pantalla principal del FactoryTalk View Studio ME

Para descargar los programas creados tanto a la pantalla táctil como al PLC se utilizó una conexión Ethernet, para este fin se le dio una dirección a cada uno de los dispositivos de la red (dirección IP), como se muestra en la *Tabla 5.2*.

² Ver Apéndice A.1.2

Tabla 5.2 Dirección de cada dispositivo dentro de la red

Dispositivo	Dirección IP
PC	169.254.187.1
Panel View	169.254.187.201
PLC	169.254.187.20

Luego de haber definido y grabado la dirección IP a cada uno de los dispositivos, tanto la descarga de los programas, como la conexión entre ellos, se realizó por medio de Ethernet mediante el Switch NS-205(*Figura 5.3*).

d. PACTware

Este programa se utilizó en este proyecto para la programación de los sensores de presión mediante protocolo HART, PACTware (Process Automation Configuration Tool), es un software independiente del fabricante y del bus de campo para la configuración de todo tipo de equipo de campo.

5.3 Solución final

Al inicio de este capítulo se definieron las 4 etapas en las que se dividió el proyecto. La solución a cada una de estas se muestra de manera detallada a continuación, tanto en su parte de hardware como de software.

5.3.1 Control de variadores de frecuencia y automatización de la dosificación de cal al macerador.

En esta etapa se necesitaba que el flujo de cal por minuto que entraban al macerador variará en relación con el flujo de maíz por minuto que también entraban al mismo.

Para lograr esto de manera automática, se debía de controlar desde el PLC tanto el tornillo sinfín encargado de dosificar la cal, como el encargado de depositar el maíz al macerador. Esto se logró mediante la integración de los variadores de frecuencia que controlaban los motores de estos tornillos sinfín al PLC.

Para controlar los variadores de manera remota desde el PLC, se debían hacer cambios en la configuración de sus parámetros y crear un programa de usuario para su monitoreo y control.

Además de controlar el dosificador de cal y el gusano de maíz desde el PLC, la empresa también solicitó que se controlara la banda nixtamal, el macerador y la retentora a cernedora 1, por lo que fueron agregados al proyecto. Dando un total de 5 variadores de frecuencia a controlar de manera remota desde el PLC.

Hardware

Antes de este proyecto, el motor del tornillo sinfín del maíz, era operado por un variador de frecuencia Siemens Micromaster 420 (*Figura 5.7 a y b*), mediante la interfaz de usuario BOP (Basic Operator Panel, *Figura 5.7 c*) del mismo, que permitía incrementar o decrementar la frecuencia de trabajo del motor de 0Hz a 60Hz según los parámetros configurados de antemano. En cambio, el tornillo sinfín de la cal era controlado por un variador “Telemecanique Altivar 31”, el cual fue cambiado por un Micromaster 420, pues como ya se mencionó se quería utilizar solo este tipo de variador para el proyecto, debido a lo robustos y confiables que son.



Figura 5.7 Variador de Frecuencia Micromaster 420 del tornillo sinfín del maíz

Antes de trasladar estos variadores al gabinete de potencia, se definió estadísticamente mediante la toma de 43 muestras, cual era la relación promedio de los gramos de cal por minuto que depositaba el tornillo sinfín al macerador en función de la frecuencia que lo controlaba. Esto se logró tomando muestras de gramos de cal por minuto para diferentes frecuencias, y luego obteniendo el promedio de éstas. Este método es usado y recomendado por los operadores del molino. Los datos obtenidos son los mostrados en la *Tabla 5.3*, dando como resultado una constante promedio de 24.51gr cal/min·Hz.

Las muestras fueron tomadas entre 12Hz y 17Hz debido a que éste es el rango común en el que opera el variador de frecuencia.

Tabla 5.3 Cálculo de relación de los gramos de cal por minuto por cada Hertz del variador de frecuencia

Muestra	Flujo cal (gr/min)	Frecuencia (Hz)	Relación gr/min·Hz
1	320.50	12.7	25.24
2	331.70	12.9	25.71
3	338.70	12.9	26.26
4	336.40	13	25.88
5	454.00	13.5	33.63
6	376.70	13.5	27.90
7	338.20	13.6	24.87
8	325.80	14.2	22.94
9	331.00	14.5	22.83
10	339.00	14.5	23.38
11	373.80	14.5	25.78
12	356.30	14.5	24.57
13	359.90	14.5	24.82
14	374.00	14.5	25.79
15	385.50	14.5	26.59
16	340.60	15	22.71
17	346.50	15	23.10
18	330.00	15	22.00
19	343.90	15	22.93
20	330.60	15	22.04
21	372.30	15.3	24.33
22	383.60	15.8	24.28
23	353.00	16	22.06
24	346.10	16	21.63
25	356.60	16	22.29
26	354.50	16	22.16
27	354.70	16	22.17
28	395.30	16	24.71
29	394.30	16	24.64
30	390.70	16	24.42
31	407.00	16	25.44
32	368.40	16	23.03
33	395.30	16	24.71
34	388.20	16	24.26
35	382.00	16	23.88
36	414.60	16.2	25.59
37	490.20	16.2	30.26
38	384.50	16.5	23.30
39	385.20	16.5	23.35
40	408.00	16.7	24.43
41	394.00	16.7	23.59
42	439.40	17.1	25.70
43	421.00	17.1	24.62
		Promedio	24.51

Este mismo proceso se realizó para determinar el flujo de maíz en kilogramos por minuto que entraban al macerador en función de la frecuencia del variador del tornillo sinfín del maíz, solo que en este caso se tomaron 30 muestras de 10 segundos cada una, en dos diferentes frecuencias 35Hz y 40Hz. Luego, se multiplicaba por 6 el dato obtenido y se obtiene el flujo en kilogramos por minuto. Esto pues si se tomaban muestras durante un minuto, las mismas iban a ser muy grandes, alrededor de 100Kg de maíz, lo que dificultaba el muestreo. Los datos obtenidos se muestran en la *Tabla 5.4*.

Tabla 5.4 Flujo de maíz por minuto para 35Hz y 40Hz

Variador de frecuencia del gusano de maíz				
Frecuencia: 35 Hertz			Frecuencia: 40 Hertz	
Muestra	Flujo maíz Kg/10seg	Flujo maíz Kg/min	Flujo maíz Kg/10seg	Flujo maíz Kg/min
1	17.60	105.60	20.30	121.80
2	17.00	102.00	20.00	120.00
3	17.40	104.40	20.50	123.00
4	17.80	106.80	20.50	123.00
5	16.40	98.40	18.80	112.80
6	17.90	107.40	20.50	123.00
7	18.90	113.40	19.50	117.00
8	18.7	112.20	19.9	119.40
9	17.30	103.80	20.30	121.80
10	19.10	114.60	19.50	117.00
11	17.50	105.00	20.30	121.80
12	17.30	103.80	20.10	120.60
13	17.50	105.00	20.30	121.80
14	19.50	117.00	20.20	121.20
15	17.10	102.60	19.70	118.20
16	16.80	100.80	20.10	120.60
17	18.30	109.80	20.30	121.80
18	17.30	103.80	20.70	124.20
19	18.70	112.20	19.70	118.20
20	18.70	112.20	19.90	119.40
21	18.50	111.00	21.30	127.80
22	19.50	117.00	20.70	124.20
23	18.50	111.00	19.90	119.40
24	18.10	108.60	20.50	123.00
25	19.50	117.00	20.50	123.00
26	17.90	107.40	20.10	120.60
27	19.10	114.60	20.30	121.80
28	17.30	103.80	20.30	121.80
29	17.70	106.20	20.10	120.60
30	19.50	117.00	20.10	120.60
Promedio		108.48	120.98	

A 35Hz se obtiene un promedio de 108.48 Kg maíz/min lo que da como resultado 3.10 kilogramos de maíz por minuto por Hertz del variador de frecuencia y

para 40Hz se obtiene una relación de 3.02Kg maíz/min·Hz. El promedio entre estas dos relaciones muestra una constante 3.06Kg maíz/min·Hz, que indica que por cada Hertz que se aumente o disminuye en el variador habrá un incremento o decremento de 3.06Kg maíz por minuto a la entrada del macerador.

Tabla 5.5 Cantidad de cal y maíz por Hz

	Flujo de Cal (gr Cal/min·Hz)	Flujo de Maíz (Kg maíz/min·Hz)
Constante	24.51	3.06

La obtención de las dos constantes mostradas en la *Tabla 5.5* es de vital importancia para la realización del programa de control automático de la cal, como se muestra más adelante en la descripción del software de esta sección.

La instalación de los VDF³ al gabinete y su conexión al PLC, se realizó cuando la planta estaba sin producción con el fin de no afectar el proceso. Además de los variadores de la cal y del maíz, también se llevaron al gabinete el del macerador, la banda nixtamal y el de la cernedora a retentora 1, como lo había solicitado la empresa.

Luego de estudiar el manual del variador de frecuencia del Micromaster 420 [11], se concluyó que para el control de éste desde el PLC, era necesario el control de 3 de las señales de sus bornes de mando (*Figura 5.8*), además de la reprogramación de algunos de sus parámetros. Estas 3 señales son:

- Entrada analógica (bornes 3 y 4): Por medio de ésta se controla el Set Point (SP) o valor deseado de frecuencia.
- Salida analógica (bornes 12 y 13): Por medio de ésta se monitorea el valor del proceso o Process Value (PV), que es el valor real de la frecuencia del VDF, que constituye la confirma de la misma.
- Bornes 5 y 8: Se necesita hacer un puente entre estos para encender el VDF o quitarlo para ser apagado.

³ Ver Apéndice A.1.2

Borne	Significado	Funciones
1	-	Entrada +10 V
2	-	Entrada 0 V
3	ADC+	Entrada analógica (+)
4	ADC-	Entrada analógica (-)
5	DIN1	Entrada digital 1
6	DIN2	Entrada digital 2
7	DIN3	Entrada digital 3
8	-	Salida aislada +24 V / máx. 100 mA
9	-	Salida aislada 0 V / máx. 100 mA
10	RL1-B	Salida digital / contacto de trabajo
11	RL1-C	Salida digital / conmutador
12	DAC+	Salida analógica (+)
13	DAC-	Salida analógica (-)
14	P+	Conexión RS485
15	N-	Conexión RS485

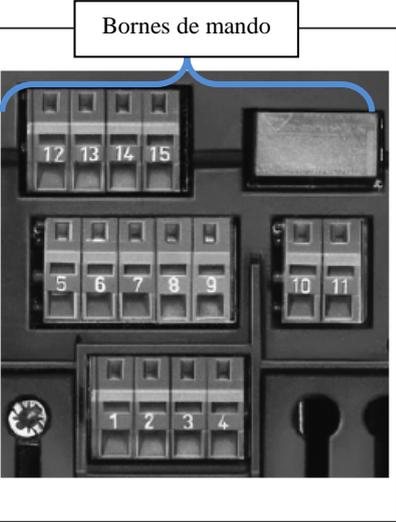


Figura 5.8 Bornes de mando del Micromaster 420

Para controlar el “Set Point” del VDF se utilizó el módulo de salidas analógicas 1746-NO4I del PLC, desde éste se llevaba la señal control analógica 0-20mA hasta la entrada analógica del VDF (bornes 3 y 4) con el fin de variar su frecuencia. Esta entrada debe ser de 0-10V, donde 0V equivale a 0Hz y 10V a 60Hz, por lo que se conectó una resistencia de 500Ω entre estos bornes con el fin de convertir la señal 0-20mA en una señal de tensión de 0 a 10V.

Para monitorear el valor del proceso conectó la señal de salida analógica del VDF (bornes 12 y 13) al módulo de entradas analógicas 1746-NI8 del PLC. Esta salida es de 4-20mA por lo que se conecta de manera directa a este módulo.

Con el fin de encender y apagar el variador de frecuencia, se conectó un relé (R) entre los bornes 5 y 8 del PLC en serie con el relé (C) del contactor que conecta la carga al VDF como se muestra en la *Figura 5.9*



Figura 5.9 Conexión del relé (R) para el encendido y apagado del VDF

De esta manera, cada variador de frecuencia instalado se podrá encender solamente si es activado desde el PLC y si a su vez se le ha conectado la carga.

Luego de realizar las conexiones ya mencionadas, la tarea siguiente era reprogramar algunos de los parámetros del variador, los cuales se muestran en la *Tabla 5.6*. Mediante el P0700 y el P1000 se programaba que el variador funcionara de manera remota y no desde el BOP.

Tabla 5.6 Descripción de los parámetros reprogramados del VDF

Parámetro	Descripción
P0100	0 = KW/50Hz
	1 = hp/60Hz (seleccionado)
	2 = KW/60Hz
P0304	Tensión nominal del motor
P0305	Corriente nominal del motor
P0307	Potencia nominal del motor en hp
P0310	Frecuencia nominal del motor
P0311	Velocidad nominal del motor
P0700	Selección de la fuente de ordenes 1 = BOP
	2 = Bornes/terminales (seleccionado)
P1000	Selección de la consigna de frecuencia 1 = BOP
	2 = Consigna de fábrica (seleccionado)
P1080	Frecuencia mínima del motor (0Hz)
P1082	Frecuencia máxima del motor (60Hz)
P1120	Tiempo de aceleración (10s)
P1121	Tiempo de deceleración (10s)

Los demás parámetros se programan con las características de cada motor, las cuales son mostradas en la *Tabla 5.7*.

Tabla 5.7 Características de los motores

Parámetro	Motores				
	Banda Nixtamal	Gusano de Maíz	Macerador	Retentora a cernedora 1	Dosificador de cal
P304	440V	440V	440V	440V	440V
P305	1,5A	4,9A	12,5A	4,9 ^a	1.0A
P307	0,8Hp	2,2Hp	7,5Hp	2,2Hp	0.5Hp
P310	60Hz	60Hz	60Hz	60Hz	60Hz
P311	1760rpm	1425rpm	1750rpm	1425rpm	1425rpm

A continuación se describe el software diseñado, el cual, es capaz de controlar los variadores de frecuencia desde el PLC, con la pantalla táctil como interfaz para el usuario.

Software

Para controlar los variadores de frecuencia se crea una pantalla en el programa de la pantalla táctil, que centraliza lo posibilidad de subir o bajar la frecuencia de trabajo de cada uno de los variadores como se muestra en la *Figura 5. 10*, en la cual describen algunos de las partes que la componen.

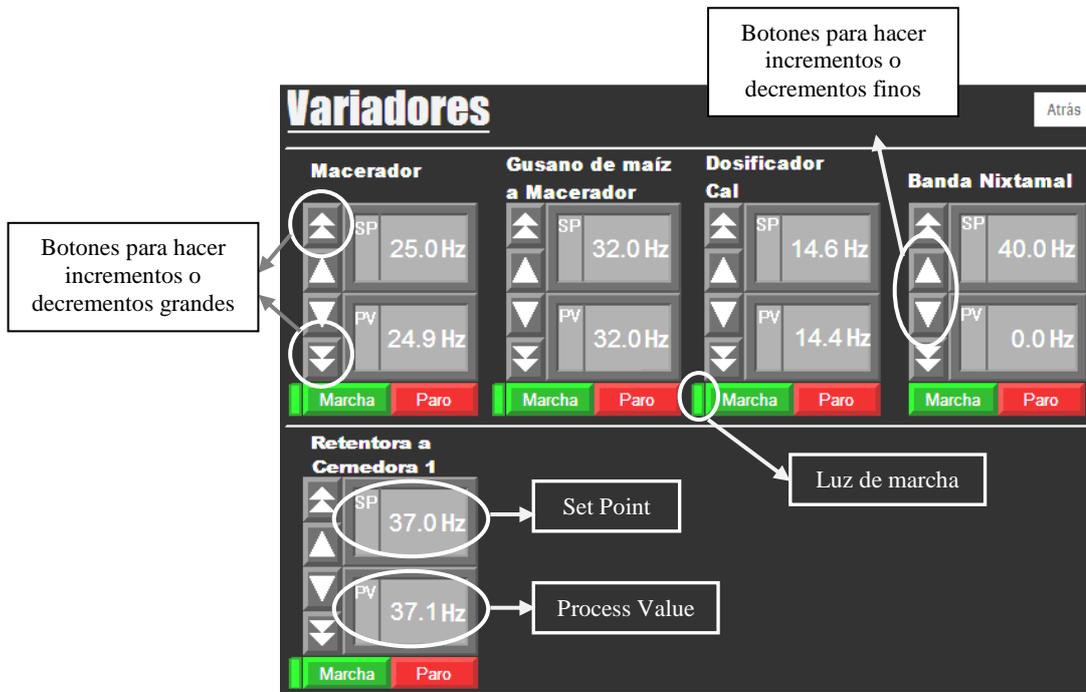


Figura 5. 10 Pantalla para manejo de los variadores de frecuencia

Esta pantalla está enlazada con un programa en el PLC que permite controlar la frecuencia del VDF mediante el escalamiento del set point (SP) o consigna impuesto por el usuario. Esto lo hace primero tomando el valor de 0 a 60Hz de SP elegido, luego lo escala a un valor digital que puede ir de 0 a 31208, el cual mediante el convertidor digital/analógico del PLC es transformado en un valor analógico de corriente entre los 0 y 20mA, que finalmente es el encargado de controlar el variador.

Para mostrar el valor del Process Value (PV) o valor real del proceso se sigue el mismo procedimiento que el SP pero en forma inversa, es decir, el PLC toma la señal analógica de 4-20mA del variador, la convierte en digital y luego la escala a una señal de 0 a 60Hz que se muestra finalmente.

Los botones de marcha y paro activan o desactivan el relé encargado de encender el VDF. Si se presiona el botón de marcha aparece una luz parpadeante verde a su derecha indicando que está encendido.

Los variadores de frecuencia del macerador, del tornillo sinfín de maíz al macerador, del dosificador de cal y banda nixtamal poseen enclavamiento. Es decir, no se puede encender sin haber encendido el anterior, como se muestra en la *Tabla 5.8*.

Tabla 5.8 Enclavamiento de los VDF del Molino

Botón Marcha	Enclavamiento(necesita estar encendido)
Macerador	Ninguno
Gusano de Maíz	Macerador
Dosificador de Cal	Macerador, gusano de maíz
Banda Nixtamal	Macerador, gusano de maíz, dosificador de cal

Luego de integrar el control del variador de frecuencia del tornillo sinfín de maíz al macerador y el del dosificador de cal, se creó un programa encargado de controlar de manera automática la dosificación de la cal, esto mediante el PLC y la pantalla mostrada en la *Figura 5.11*.

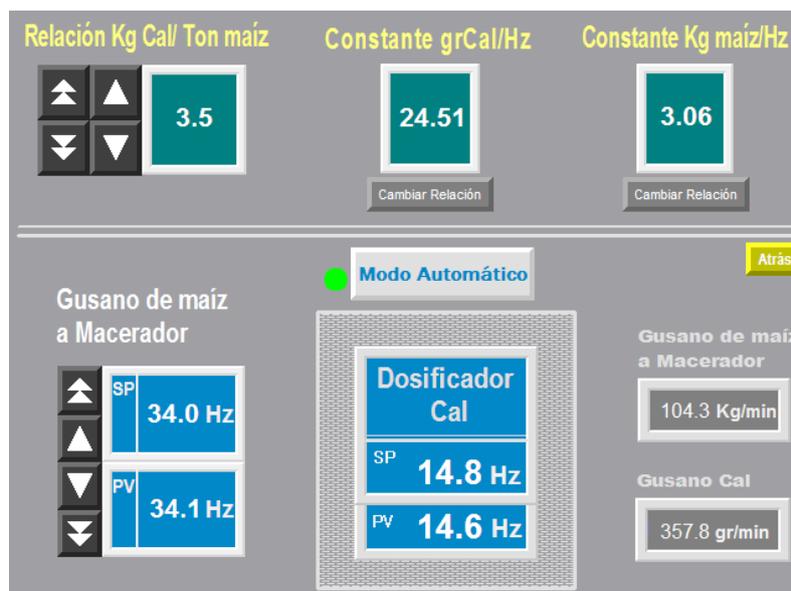


Figura 5.11 Pantalla para el control automático de la cal

Las constantes de gr Cal/Hz y la de Kg maíz/Hz determinadas en el capítulo 5.3 (*Tabla 5.5* Cantidad de cal y maíz por Hz), solo pueden ser cambiadas por los molineros mediante una contraseña. Caso contrario, el de la relación de kilogramos de cal por tonelada de maíz (Kg Cal/Ton Maíz) puede ser cambiada por cualquiera de los operarios. Estos tres valores, más el valor de la frecuencia del tornillo sinfín de maíz ($Hz_{maíz}$), son necesarios para realizar el cálculo automático de la frecuencia a la que debe trabajar el dosificador de cal (Hz_{cal}). Esto se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$Hz_{cal} = \frac{Hz_{Maíz} \times Cte. \frac{Kg \text{ Maíz}}{Hz} \times Relación \frac{Kg \text{ Cal}}{Ton \text{ Maíz}}}{Cte. \frac{gr \text{ Cal}}{Hz}}$$

Esta ecuación fue implementada en el PLC y se ejecuta al presionar el botón de modo automático en la pantalla. Si se desea volver a controlar el variador de frecuencia de la cal de manera manual, aparecerá un botón “Manual” en la pantalla de control de los variadores de frecuencia (*Figura 5. 10*).

5.3.2 Monitorizado del nivel del silo de reposo.

En esta sección se describe la solución tanto de hardware como de software implementada para medir el nivel del silo de reposo.

Hardware

Para medir el nivel de este silo se decidió utilizar el sensor de radar de onda guiada o TDR (Time Domain Reflectometry, reflectometría en el dominio del tiempo) Optiflex 1300 C de la marca Krohne, debido a sus características de medición, las cuales se adecuan de manera precisa tanto a las condiciones que imperan dentro del silo (polvo, adherencias, vapor, humedad, altas temperaturas) como al producto que contiene.

Una de las características más relevantes que poseía este sensor es el no verse afectado por el ángulo de talud (*Figura 5.12*) del material dentro del silo, el cual en este

caso en particular puede llegar a medir alrededor de 30° , ángulo que distorsiona la medición en otro tipo de sensores, como los ultrasónicos o de radar que fueron mencionados en el marco teórico.

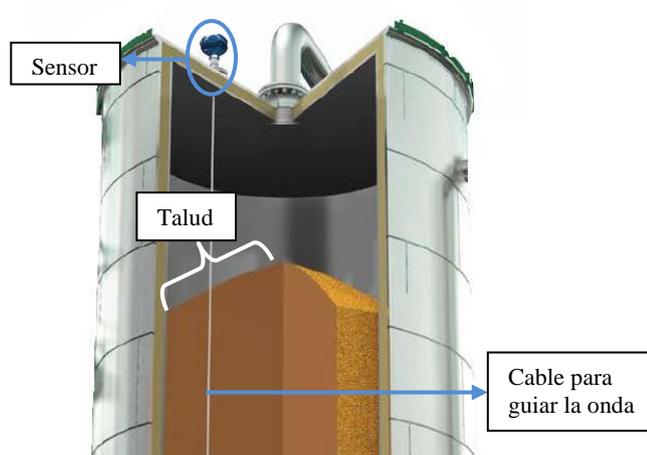


Figura 5.12 Descripción del talud dentro de un silo (parte superior)

Para la instalación del TDR se siguieron las instrucciones de [7], se abrió un boquete en la parte superior del silo donde se coloca y enrosca el sensor con la sonda (elemento físico que sirve de guía para la señal) como se muestra en la *figura 5.13*.

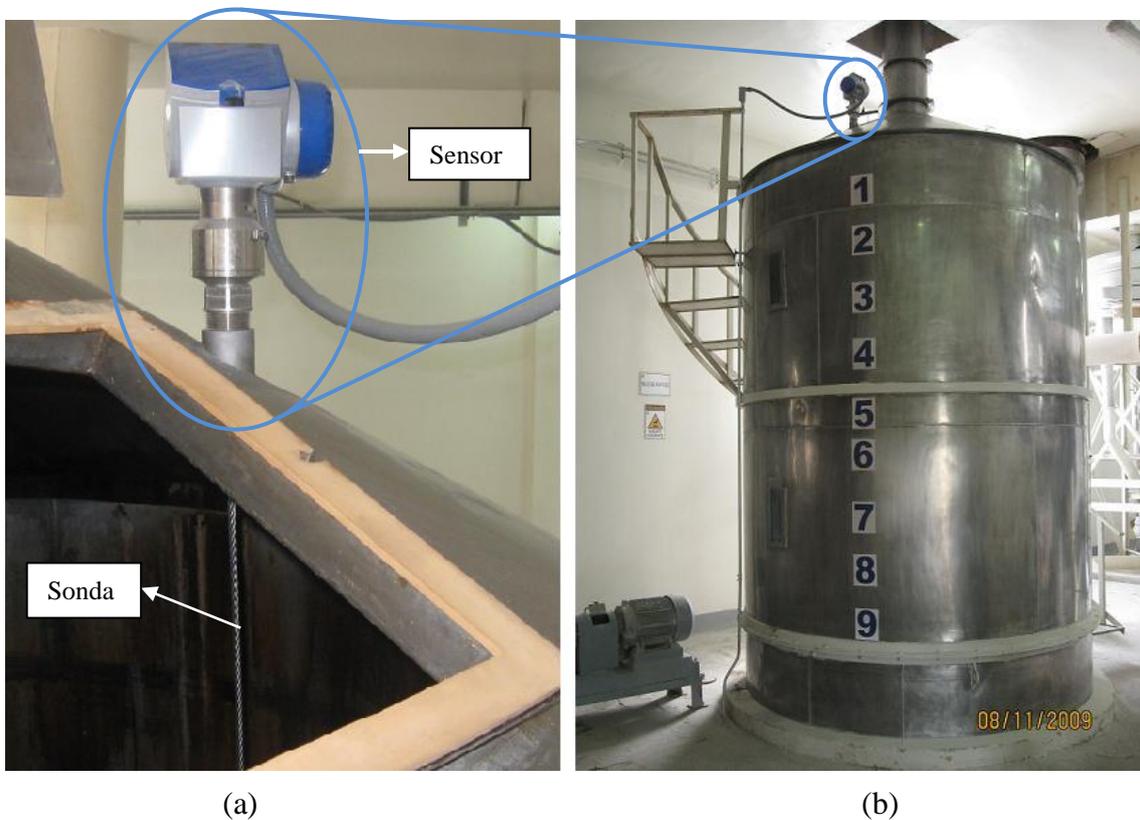


Figura 5.13 Instalación del sensor en el silo.

Este sensor posee una pantalla LCD (Figura 5.14) mediante la cual se programan y monitorean sus parámetros. Algunos de estos parámetros solo pueden ser configurados por el proveedor del sensor, pues necesitan una contraseña para ser cambiados. Los parámetros más relevantes que sí podían ser configurados y que se reprogramaron se muestran en la Tabla 5. 9. La salida de este sensor es de 4 a 20mA.



Figura 5.14 Pantalla LCD del TDR.

Tabla 5. 9 Parámetros configurados para el funcionamiento del Sensor de Radar (TDR)

N° Menú	Función	Descripción	Selección
C.1.1	Tipo de instalación	Lugar donde se instala el sensor	Tanque metálico
C.1.6	Longitud de la sonda	Largo del cable utilizado para dirigir la señal	6 metros
C.1.9	Distancia de bloqueo	Distancia a partir de la cual el sensor empieza a medir valores	0.3 metros
C.3.1	Función de salida	Parámetro que se quiere tener escalado en la salida de corriente	Nivel
C.3.2	Ajuste 4mA	Ajuste de medida para 4mA	0 metros
C.3.3	Ajuste 20mA	Ajuste de medida para 20mA	6 metros
C.3.4	Rango de salida	Seleccionar el rango de salida de corriente	4-20mA

Luego de configurar y asegurarse del buen funcionamiento del sensor de radar de onda guiada se procedió a instalar en el PLC y la pantalla táctil el software diseñado para el monitoreo del nivel del silo de reposo.

Software

El software de monitoreo del nivel del silo inicia con el escalamiento de la señal 4-20mA por parte del PLC, convirtiendo esta señal analógica al valor numérico del nivel en el que se encuentra el maíz, que va desde 0 hasta 16.

Después de haber escalado la señal, se procede a cargar en el programa de la pantalla táctil, la pantalla dinámica diseñada, por medio de la cual se puede monitorear el nivel en el silo de reposo, además del flujo de maíz que está entrando al mismo. Esto se muestra en la *Figura 5.15*.



Figura 5.15 Pantalla principal de monitoreo del silo de reposo

5.3.3 Monitorizado de presiones

Esta etapa del proyecto consiste en la medición de las presiones de agua, aire y vapor, con el fin de monitorear de manera sencilla y centralizada si se encuentran entre los rangos deseados.

Los sensores de presión utilizados fueron tres Honeywell ST300 Serie 900 (*Figura 5.16*), recomendados por ser robustos, fiables y precisos, además trabajan con

una señal 4-20mA HART mediante la cual se envía el dato de presión medido, y permite la programación de los parámetros para la calibración del sensor mediante el programa Pactware.



Figura 5.16 Sensor de presión Honeywell ST3000 S900

Hardware

Para la programación de estos sensores a través del protocolo HART con el programa Pactware, es necesario crear una comunicación entre la computadora y el dispositivo ST3000 S900 mediante el circuito que se muestra en la *Figura 5.17*.



Figura 5.17 Circuito de comunicación HART

Esta programación se realizó con ayuda del ingeniero de soporte técnico de la empresa que distribuye el producto. Esto pues ellos poseían el modem HART necesario para la calibración del sensor, el cual no fue adquirido por DEMASA, además del programa PACTware para la comunicación de la PC con el ST3000.

Los parámetros principales que se deben programar a cada uno de los sensores, son la presión mínima y la máxima a medir, esto con el fin de asignarla 4mA y 20mA

respectivamente. En la *Tabla 5.10* se muestran estos rangos, los cuales fueron elegidos de acuerdo con los valores más comunes de presión para cada elemento.

Tabla 5.10 Rangos de presión de los sensores

Sensor	Rango mínimo y máximo de presión (psi)	Valor de corriente (mA)
Aire	0	4
	200	20
Agua	0	4
	100	20
Vapor	0	4
	150	20

Software

La señal proveniente del sensor fue conectada módulo 1746 NI8 de entradas analógicas del PLC, luego mediante el escalamiento hecho a la señal 4-20mA se convirtió la misma a un valor entre 0-200psi para el de aire, 0-100psi para el de agua y 0-150psi para el de vapor. Datos que iban a ser enlazados con el programa diseñado en la pantalla táctil para el respectivo monitoreo de estas señales.

La *Figura 5.18* muestra la pantalla diseñada para el monitoreo de estas presiones, también este programa brinda una señal de alarma para cuando estas poseen un valor por debajo del mínimo establecido (30psi para el agua, 80psi para el aire y 45psi para el vapor), el cual es señalado con rojo en los medidores.

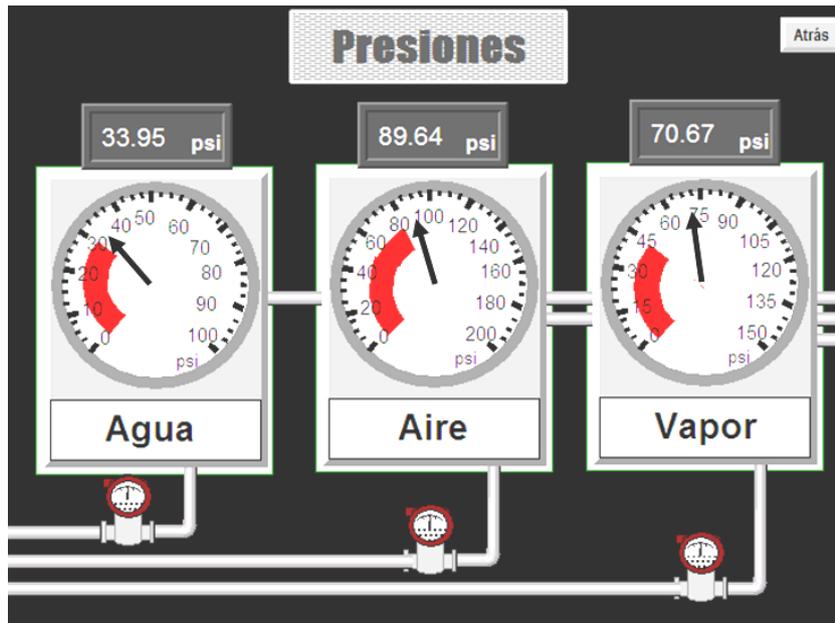


Figura 5.18 Pantalla para monitoreo de las presiones.

5.3.4 Direccionamiento de la harina

Como anteriormente ya se mencionó, el direccionamiento de la harina se realizaba anteriormente por medio de válvulas desviadoras accionadas de manera neumática una por una. Para esta etapa se implementó un sistema automático de accionamiento por medio de válvulas solenoides, mediante una pantalla creada desde donde se controla el proceso.

Hardware

Las válvulas desviadoras de harina funcionaban de manera manual mediante el accionar de un pistón que contienen. Este era cambiado de posición por medio de una manguera con aire comprimido que se insertaba en uno de dos agujeros, dependiendo del cambio que se quería realizar, como se muestra en la *Figura 5.19*.

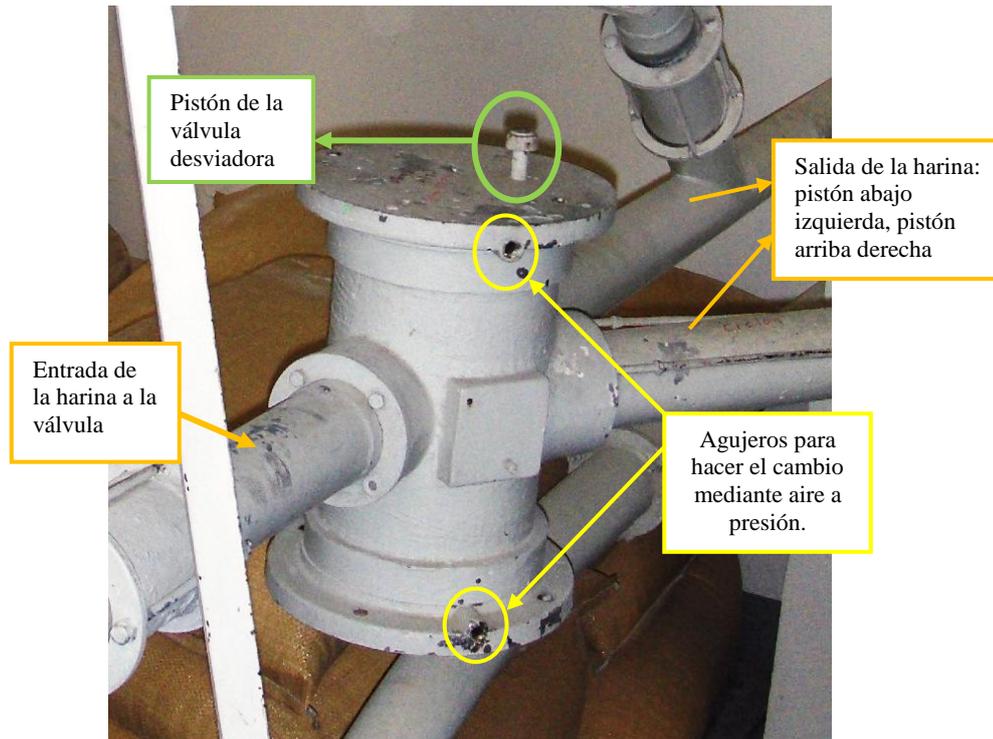


Figura 5.19 Válvula desviadora

Con el proyecto se instaló un sistema eléctrico para el control del pistón mediante una válvula solenoide que es activada desde el PLC, cuyo objetivo era insertar aire a presión en uno de los dos agujeros para subir o bajar el pistón y cambiar la dirección de la harina. La instalación de la esta válvula solenoide es mostrada en la *Figura 5.20*.

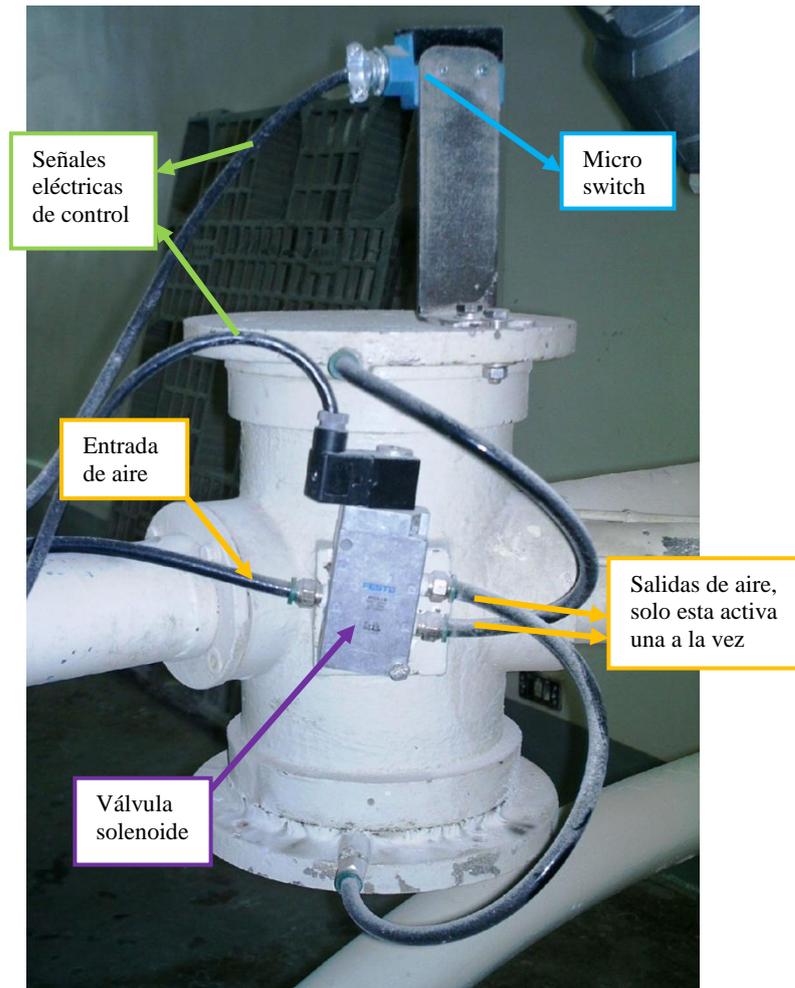


Figura 5.20 Válvula desviadora con solenoide y Micro switch instalado.

Además de la válvula solenoide también se le instaló un micro switch a cada válvula desviadora. Este es el encargado de la confirmación de posición del pistón. Cuando el pistón sube, acciona el micro switch, el cual envía la señal eléctrica al PLC que indica que el pistón está arriba.

La instalación de éste, se realizó como se muestra en la *Figura 5.21*. En esta se puede observar como el pistón está presionando el botón del micro switch, el cual activa la señal de confirmación, ya antes mencionada.

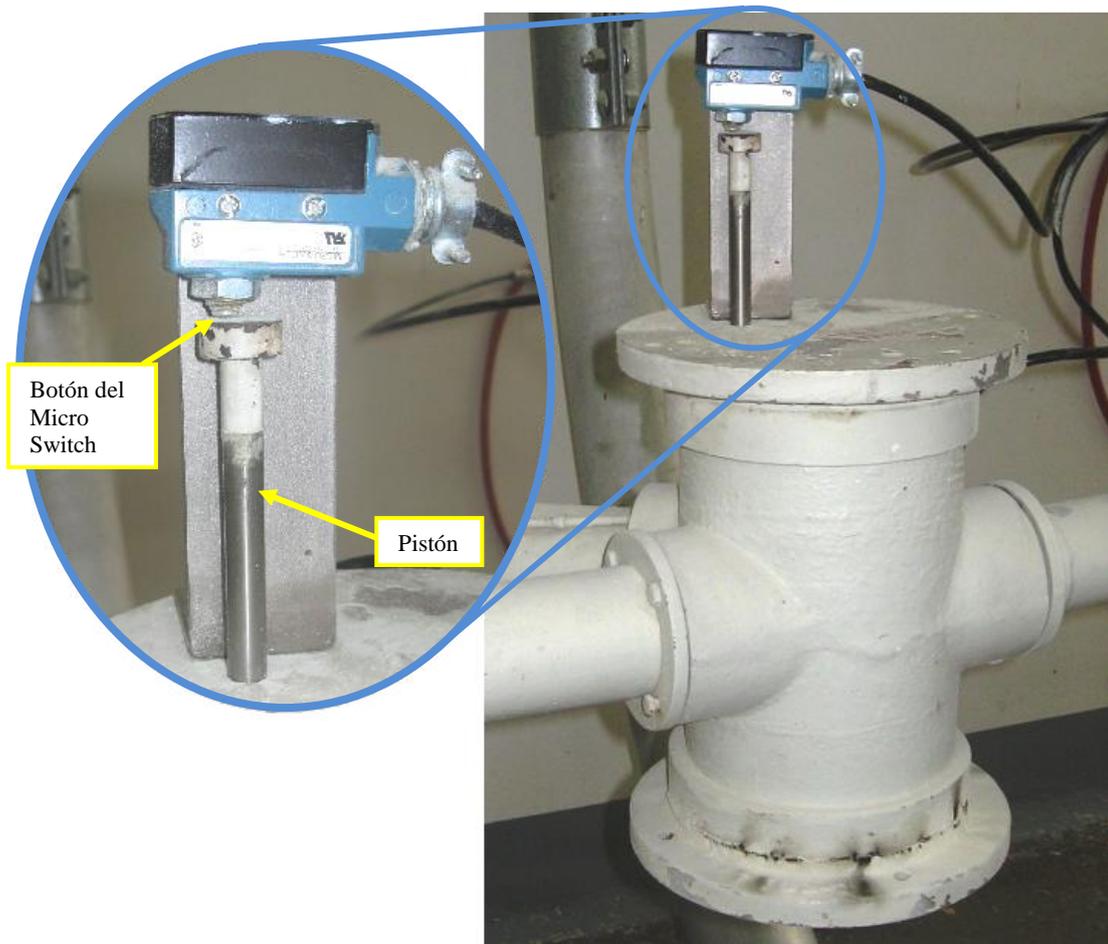


Figura 5.21 Micro Switch instalado en la válvula desviadora

También en este proyecto se conectaron en el PLC las señales de cuatro interruptores de nivel de paleta rotativa que se encontraban instalados en las tolvas 1, 2, 3 y 4, que se encargan de indicar cuando alguna de estas se encuentra llena.

Software

Para el manejo de las válvulas solenoides se diseñó un programa en el PLC que mediante una señal activa o desactiva las mismas por medio de un módulo de salidas discretas de 110V (1746-OW16). Este programa contenía la secuencia de encendido o apagado de válvulas para un determinado direccionamiento de la harina. Esto partiendo del diagrama de flujo que se muestra en la *Figura 5.22*. En éste se muestran tres lugares desde donde puede provenir la harina (molino, reproceso, tolvas 3 y 4), siete destinos de almacenamiento (tolvas 1, 2, 3 y 4, silos de lona, Silo harina frituras, remoedor), los cuales dependen del estado (ON, OFF) de cada una de las válvulas (V1, V2, V3, V4, V5, V7, V8).

Por ejemplo si se desea direccionar a la tolva 3, se tienen dos opciones de fuente de la harina que serían molino y reproceso, por lo que el programa creado permite al usuario elegir cuál de éstas desea. Luego de que el usuario selecciona alguna de las dos se activan o desactivan las válvulas necesarias para este direccionamiento. En la *Tabla 5.11* se muestra el estado de las válvulas para cada una de estas opciones.

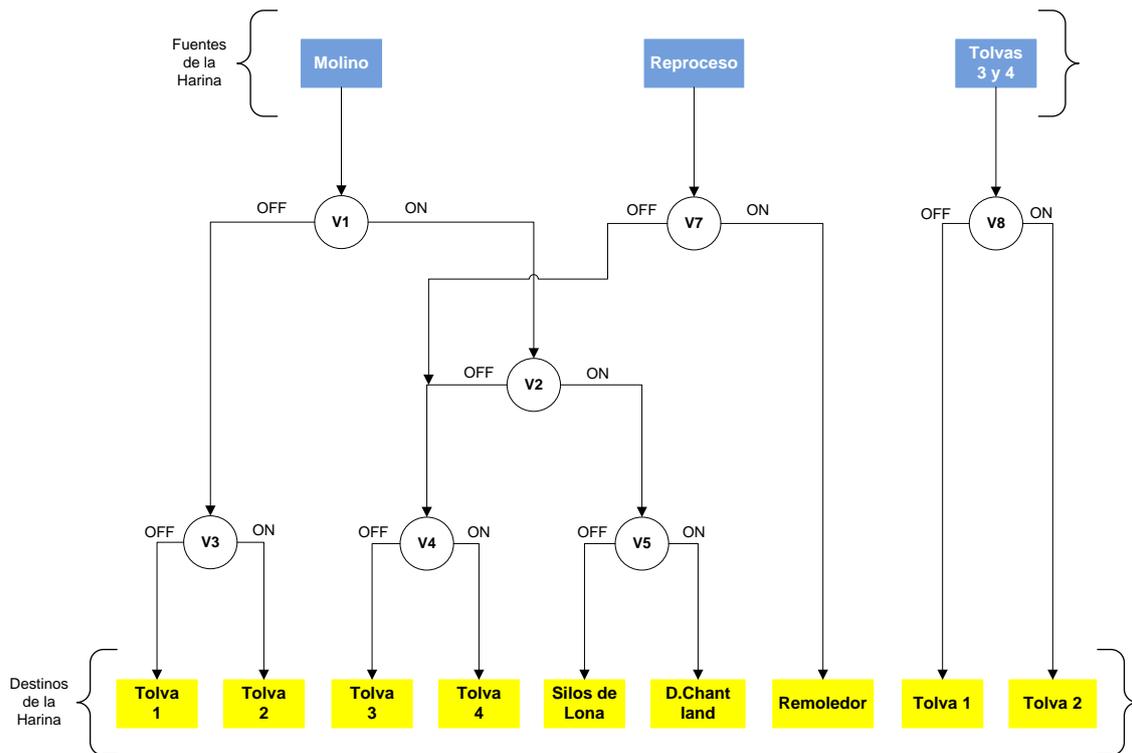


Figura 5.22 Diagrama de flujo para el direccionamiento de la harina

Tabla 5.11 Estado de las válvulas cuando el destino de almacenamiento es la tolva 3

Válvula (V)	Fuente Molino	Fuente Reproceso
	Estado	Estado
1	ON	No importa
2	OFF	No importa
3	No importa	No importa
4	OFF	OFF
5	No importa	No importa
7	No importa	OFF
8	No importa	No importa

En la figura 5.23 se muestra la imagen de la pantalla táctil encargada del monitoreo y control de la secuencia de encendido y apagado de las válvulas para el direccionamiento de la harina, la cual cuenta con botones en la parte superior para elegir

el destino de la harina, una animación del mismo mediante tuberías, estado y confirma de las válvulas. Además se muestran los indicadores que emergen como una señal de alarma si está llena alguna de las tolvas.

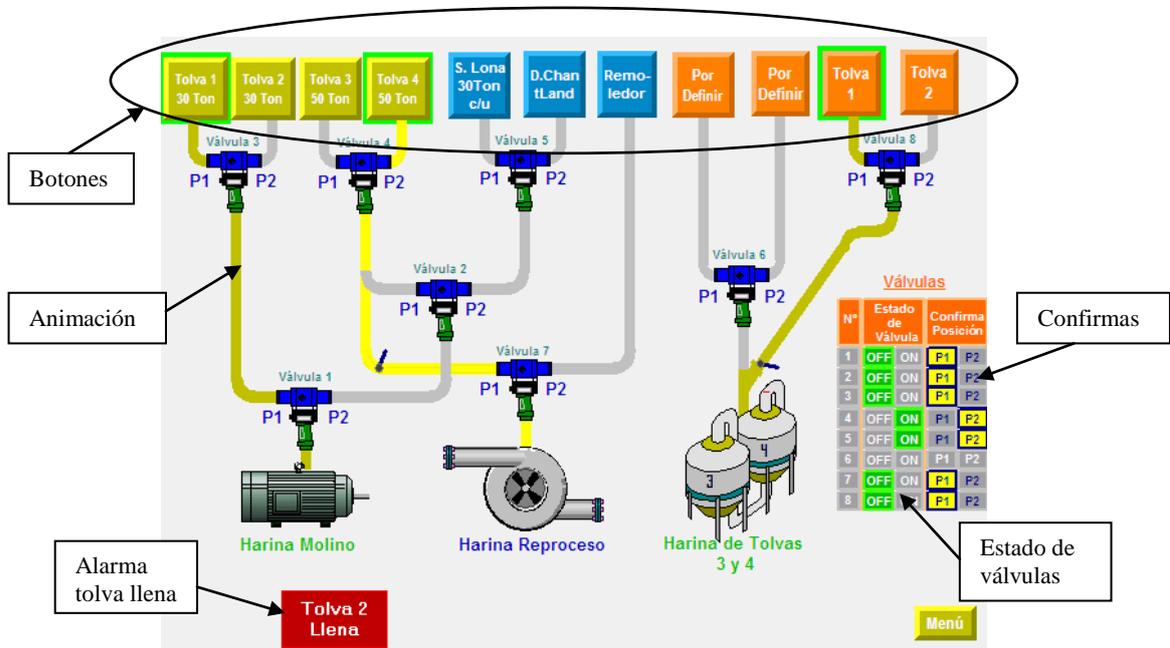


Figura 5.23 Pantalla para el control y monitorizado del direccionamiento de la harina

Capítulo 6: Resultados y análisis

6.1 Resultados

Luego de haber puesto en marcha el control de los variadores de frecuencia desde la pantalla táctil, se obtuvieron datos de la consigna o set point (SP) y del valor del proceso o process value (PV) (Tabla 6.1), con el objetivo de determinar si este control se estaba realizando de manera correcta, pues estos dos valores debían ser iguales o muy similares.

Tabla 6.1 Valores de Set Point (SP) y Process Value (VP) de los motores controlados

Macerador			Gusano de maíz a macerador			Dosificador Cal		
SP(Hz)	PV(Hz)	% Error	SP(Hz)	PV(Hz)	% Error	SP(Hz)	PV(Hz)	% Error
24,50	24,40	0,41	20,00	20,00	0,00	12,00	12,20	1,67
25,00	25,00	0,00	22,50	22,50	0,00	12,60	12,70	0,79
27,00	26,80	0,74	25,00	24,90	0,40	13,20	13,20	0,00
28,00	28,10	0,36	29,50	29,50	0,00	13,80	13,90	0,72
30,50	30,30	0,66	31,00	31,10	0,32	14,60	14,60	0,00
32,00	32,00	0,00	32,50	32,50	0,00	15,00	15,00	0,00
35,00	35,10	0,29	34,00	34,10	0,29	15,40	15,50	0,65
36,50	36,50	0,00	36,00	35,90	0,28	15,80	15,70	0,63
37,00	37,00	0,00	37,50	37,70	0,53	16,00	16,00	0,00
39,00	38,90	0,26	39,00	39,00	0,00	16,60	16,50	0,60

Tabla 6.2 Continuación

Banda Nixtamal			Retentora a Cernedora 1		
SP(Hz)	PV(Hz)	% Error	SP(Hz)	PV(Hz)	% Error
22,00	22,10	0,45	20,50	20,50	0,00
23,50	23,60	0,43	23,00	23,00	0,00
25,00	25,70	2,80	24,50	24,40	0,41
30,50	30,40	0,33	27,00	27,00	0,00
31,00	31,10	0,32	29,50	29,60	0,34
33,00	33,10	0,30	30,00	30,10	0,33
34,50	34,80	0,87	32,50	32,50	0,00
35,50	35,60	0,28	34,50	34,40	0,29
37,00	37,00	0,00	36,00	36,00	0,00
38,50	38,70	0,52	38,50	38,50	0,00

También se adquirieron datos de SP y PV del tornillo sinfín del maíz y el dosificador de cal, cuando éste último estaba en modo automático. Estos datos se muestran en la *Tabla 6.3*, se debe tomar en cuenta que al obtener los mismos la relación de kilogramos de cal por tonelada de maíz era de 3.5 Kg Cal/ton Maíz. La constante de la cal era de 24.51gr Cal/min·Hz y la del maíz era de 3.06Kg Maíz/min·Hz. El valor del SP es calculado por el PLC mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$Hz_{cal} = \frac{Hz_{Maíz} \times Cte. \frac{Kg \text{ Maíz}}{Hz} \times Relación \frac{Kg \text{ Cal}}{Ton \text{ Maíz}}}{Cte. \frac{gr \text{ Cal}}{Hz}}$$

Tabla 6.3 Valores de SP y PV para modo automático de dosificación de la cal

Gusano de maíz a macerador		Dosificador de cal		% de error entre el SP y el PV
SP (Hz)	PV (Hz)	SP (Hz)	PV (Hz)	Dosificador Cal
25.0	25.0	10.9	11.0	0.92
26.5	26.4	11.6	11.6	0.00
27.0	27.0	11.8	11.7	0.85
28.0	28.1	12.2	12.2	0.00
29.5	29.6	12.9	12.8	0.78
31.0	30.9	13.5	13.4	0.74
31.5	31.5	13.8	13.8	0.00
34.0	34.1	14.9	14.9	0.00
36.0	36.2	15.7	15.8	0.64
38.0	38.0	16.6	16.8	1.20

Con el sensor de radar de onda guiada, instalado y funcionando en el silo de reposo, se procedió a confirmar que la mediciones hechas por el mismo, fueran las correctas. Con este fin se programó el sensor para que en su pantalla mostrara el valor de la altura del maíz dentro del silo en metros, mismo valor que fue confirmado por medio de mediciones hechas con una cinta métrica. Los valores tomados se muestran en la *tabla 6.4*.

Tabla 6.4 Mediciones para optimizar el funcionamiento del sensor del silo de reposo

Mediciones de la altura del maíz en el silo de reposo		
Sensor (metros)	Cinta métrica	% de error
0,340	0,30	13,33
0,556	0,59	5,76
0,870	0,83	4,82
1,299	1,32	1,59
1,654	1,63	1,47
1,891	1,86	1,67
1,970	1,99	1,01
2,155	2,15	0,23
2,786	2,81	0,85
3,265	3,30	1,06
3,598	3,60	0,06
3,812	3,79	0,58
4,021	3,98	1,03
4,508	4,54	0,70
4,891	4,88	0,23
5,343	5,30	0,81
5,577	5,55	0,49
5,693	5,65	0,76
5,932	5,95	0,30

Luego de concluir el buen funcionamiento del sensor TDR instalado en el silo, se procedió a comparar el valor del nivel dado por el mismo mediante el PLC, con valores hechos por los operarios de manera visual por medio de las ventanas del silo. Estas mediciones se muestran en la *Tabla 6.5*.

Tabla 6.5 Cuadro comparativo de mediciones realizadas por el sensor y mediciones realizadas por los operarios mediante las ventanas del silo

Mediciones de nivel en el silo de reposo		
Sensor	Operario (Ventana)	% error
15.6	16.0	2.6
15.2	16.0	5.3
14.6	16.0	9.6
14.2	14.5	2.1
13.9	14.5	4.3
13.2	13.5	2.3
13.1	14.0	6.9
12.8	13.5	5.5
12.3	12.5	1.6
12.1	12.0	0.8
11.9	11.0	7.6
10.6	11.0	3.8
9.3	9.5	2.2
8.2	8.0	2.4
7.4	8.0	8.1
6.0	6.5	8.3
4.8	4.5	6.3
4.1	4.0	2.4
3.2	3.0	6.3
2.9	3.0	3.4
2.6	3.0	15.4
2.2	2.5	13.6
1.7	1.5	11.8
1.1	1.0	9.1

Como parte de los resultados se les consulto a los operarios sobre el nuevo control del proceso. Éstos mencionaron que con la implementación de este proyecto, se incrementa la confiabilidad y facilidad en el control y monitoreo de las variables del proceso. Produciendo así un aumento en la calidad del producto final.

6.2 Análisis

Analizando los resultados observados en la *Tabla 6.1*, se puede deducir que el funcionamiento de los variadores de frecuencia controlados desde el PLC es el esperado. Esto se debe a que la máxima diferencia entre la consigna (SP) y un valor real de salida (PV), producen un porcentaje de error que no supera el 1%.

La *Tabla 6.3* muestra un porcentaje de error que no supera tampoco el 1% en casi el total de sus mediciones, situación que hace visible lo confiable y preciso que es el sistema automático de dosificación de cal diseñado en este proyecto.

El correcto funcionamiento del sensor de radar de onda guiada, instalado en el silo de reposo, es confirmado en la

Tabla 6.4. En donde se compara la medida de altura del maíz dada por el sensor con la obtenida mediante una cinta métrica. Dando un porcentaje de error que ronda el 1%. Esto nos permite confirmar la veracidad y precisión del nivel del maíz en el silo a partir de los datos obtenidos por el sensor.

En la *Tabla 6.5* se nota la mejora presente en la lectura del nivel del maíz en el silo de reposo mediante la instalación del sensor, en comparación con las realizadas por los operarios anteriormente. Estas daban como resultado, errores de medición de hasta un nivel, con un porcentaje de error máximo de 15.4%. Este resultado muestra que además de ser más sencillo monitorear el nivel del maíz luego de la implementación del proyecto, también aumenta la confiabilidad de la medición realizada. Ya que reduce la posibilidad de error en la medición casi a un 0%.

Analizando el proceso de direccionamiento de la harina mediante el nuevo sistema, se nota por parte de los usuarios que ahora es muy sencillo y confiable el realizar cambios en el mismo, debido a que solo es preciso presionar el botón de destino de la harina para que el programa ejecute los cambios de válvulas necesarios. Además, el mismo permite supervisar mediante las señales de confirmación el buen funcionamiento individual de cada válvula.

Analizando las opiniones de los operarios, se concluye que el control y monitoreo del proceso luego de la implementación de este proyecto es más sencillo y fiable. Mejorando la producción y la calidad del producto final, que es la meta principal de este proyecto.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- El poder centralizar el control y monitoreo de las variables del molino en una pantalla táctil y un PLC, logra que el proceso en general sea controlado de manera más precisa y con mayor rapidez.
- Operar en forma centralizada los motores desde la pantalla táctil, permite que el control de los mismos sea más fiable y sencillo de utilizar. Esto debido a que en una misma pantalla se puede monitorear y realizar cambios a los variadores de frecuencia que los controlan.
- El sistema automático de dosificación de cal permite que el proceso sea más preciso, pues el cambio necesario en la cantidad de cal que ingresa al macerador se realiza de forma instantánea, ante cualquier cambio en la cantidad de maíz que también entra al mismo. Por lo que el control de calidad sobre el producto terminado es mayor aún.
- El monitorizado de las presiones en la pantalla táctil, permite verificar que las mismas se encuentren siempre entre los rangos establecidos de manera rápida y sencilla.
- La medición hecha de la altura del maíz en el silo de reposo mediante el sensor de radar de onda guiada Optiflex 1300C, brinda información precisa e instantánea del nivel en que se encuentra el maíz dentro de éste.
- El control de las válvulas desviadoras a través de válvulas solenoides permiten un control más sencillo y más confiable de las mismas, pues éste se realiza de manera eléctrica, dando la posibilidad de efectuarlo desde cualquier punto que se desee en la planta de molino, en este caso en específico desde el PLC.
- El hecho de poder direccionar la harina desde la pantalla, disminuye la posibilidad de errores humanos, pues el PLC es el encargado de encender o apagar las válvulas necesarias para tal acción.

Recomendaciones

- Realizar desde la pantalla táctil el control de los restantes motores de la planta. Con el fin de centralizar cada vez más el control del proceso en general. Entre los posibles motores a controlar se encuentran el de dosificación de hierro y el de dosificación de maíz quebrado.
- Analizar y definir cuales otras variables del proceso no tomadas en cuenta en este proyecto, se deben incorporar al mismo, con el propósito de que la calidad y eficiencia del producto este asegurada, no solo desde el punto de vista del producto mismo, sino también desde el punto de vista energético y por lo tanto conforme con el medio ambiente, con el fin de optimizar todo el proceso. Entre estas variables se encuentran la temperatura del silo de reposo, flujo de harina, cantidad de agua utilizada para lavar el maíz y demás.
- Instalar la ventilación adecuada en los gabinetes de potencia y de control. Estos se encuentran en un lugar cerrado, caliente y con poca ventilación.

Bibliografía

- [1] Allen Bradley Company Inc. Módulos de E/S y controladores programables SLC 500. [En Línea]. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/so/1747-so001_-es-p.pdf [Consulta: julio 2009]
- [2] Allen Bradley Company Inc. Juego de instrucciones de SLC 500 y MicroLogix 1000: Manual de referencia. (Formato PDF)
- [3] Carballo Juan Pablo, Rojas René. Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. Válvula de Solenoide. [En Línea] <http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/CARVALLOVARGASc.pdf> [Consulta: Julio 2009]
- [4] Carrier Corporation Syracuse, Variable Frequency Drive. [En Línea] http://www.xpedio.carrier.com/idc/groups/public/documents/marketing/wp_varf reqdrive.pdf [Consulta: julio 2009]
- [5] KROHNE Messtechnik GmbH & Co.KG. Optiflex 1300 C Handbook: Guided Radar (TDR) Level Meter. (Formato PDF)
- [6] Montes Diana, Montoya Ana Isabel. Redes de Datos. [En línea] <http://rdatedatos.tripod.com/rs232.htm> [Consulta: julio 2009]
- [7] KROHNE Messtechnik GmbH & Co. Optiflex 1300C HandBook, Guide Radar (TDR) Level Meter. (Formato PDF). Edición 01/2008
- [8] Piñon Pasos, Andrés J. Tecnologías actuales de comunicación de las variables de campo en la industria de proceso. [En Línea]. http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXII/documentos/A_03_IC.pdf [Consulta: julio 2009]
- [9] Rockwell Software Inc. RSLinx Classic: Getting Results Guide (Formato PDF), Junio 2005
- [10] Siemens, Micromaster 420. Instrucciones de Servicio. (Formato PDF). Edición 10/06
- [11] Siemens, Micromaster 420. Getting Started Guide. (Formato PDF). Edición 10/06
- [12] Tom Shaughnessy, PowerCET. Factor de Potencia, Armónicos y Filtros Armónicas [En Línea] <http://jaimevp.tripod.com/Electricidad/FPyArmonicos2.htm> [Consulta: Agosto 2009]

- [13] Ureña Héctor, Rodríguez Juan. Montaje y configuración de una LAN. [En Línea] http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/conocernos_mejor/ [Consulta: julio 2009]
- [14] Rockwell Software Inc. RSLogix 500: Getting Results Guide (Formato PDF), Julio 2005

Apéndice

A.1 Abreviaturas

- **PLC:** Controlador lógico programable
- **HMI:** Human machine interface, Interfaz Hombre-Máquina
- **VDF:** Variador de frecuencia

A.2 Glosario

- **Rele:** interruptor controlado por un circuito eléctrico, que por medio de una bobina y un electroimán, accionan uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos.
- **Reactor de línea:** es comúnmente un simple inductor. La reactancia inductiva del inductor atenúa la corriente de armónicos de alta frecuencia. Las armónicas de 60Hz pasan a través del inductor con poca atenuación, pero a los componentes de más alta frecuencia son filtradas con mayor o menor grado. Por esto las corrientes armónicas disminuyen cuando un reactor se conecta en serie.
- **Bornera:** regleta de conexión.
- **Nixtamal:** maíz cocinado.
- **Set Point:** valor de consigna o valor deseado por el usuario.
- **Process Value o Valor del proceso:** valor real de una variable del proceso.

A.2 Manual de usuario

MANUAL PANTALLA

➤ Cargar programa

Lo primero que se debe hacer al conectar la pantalla, es cargar el programa de molino. Para esto se presiona el botón “**Load Application**” como se muestra en la figura 1.

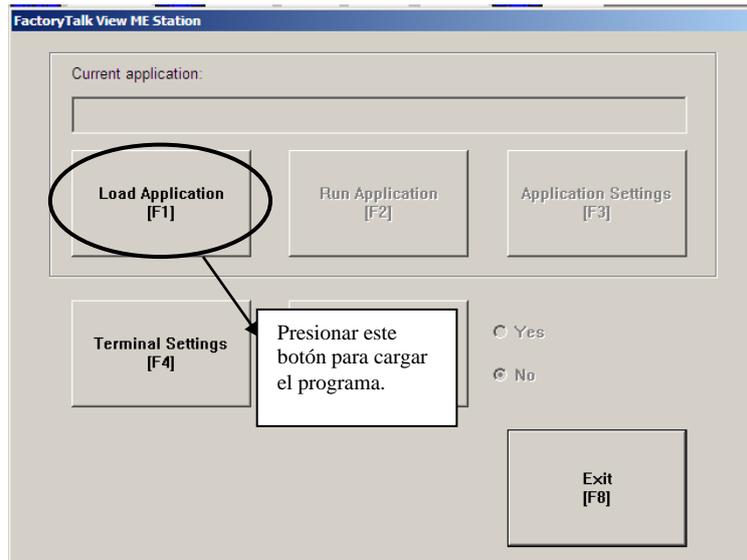


Figura 1 Primer paso para cargar el programa en la pantalla

Luego aparecerá otra pantalla. En esta se presiona el botón “**Load**” que se encuentra en la parte superior izquierda de la pantalla.

La pantalla siguiente es la última y en ésta se espera un momento hasta que aparezca el botón “**Run Application**” y se presiona para ejecutar el programa como se muestra en la figura 2.

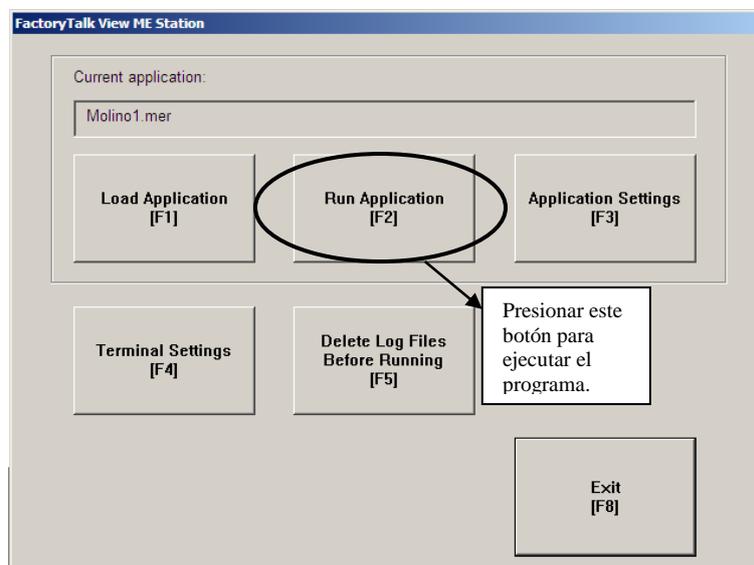


Figura 2 Tercer paso para cargar el programa en la pantalla

➤ Direccionamiento de Harina

A continuación se presenta el manual correspondiente a la pantalla para direccionamiento de harina.

Esta pantalla se conforma por los 11 botones superiores mediante los cuales se decide desde dónde y para dónde va la harina. También la pantalla está compuesta por una animación que simula mediante el cambio de color de tuberías la dirección actual de la harina. Al lado derecho de la pantalla se muestra un cuadro que indica el estado actual de las válvulas (ON o OFF), y su respectiva señal de confirma de posición, ya sea P1 o P2.

A continuación se muestra la pantalla de direccionamiento de harina (Figura 3) y un ejemplo de cómo funciona.

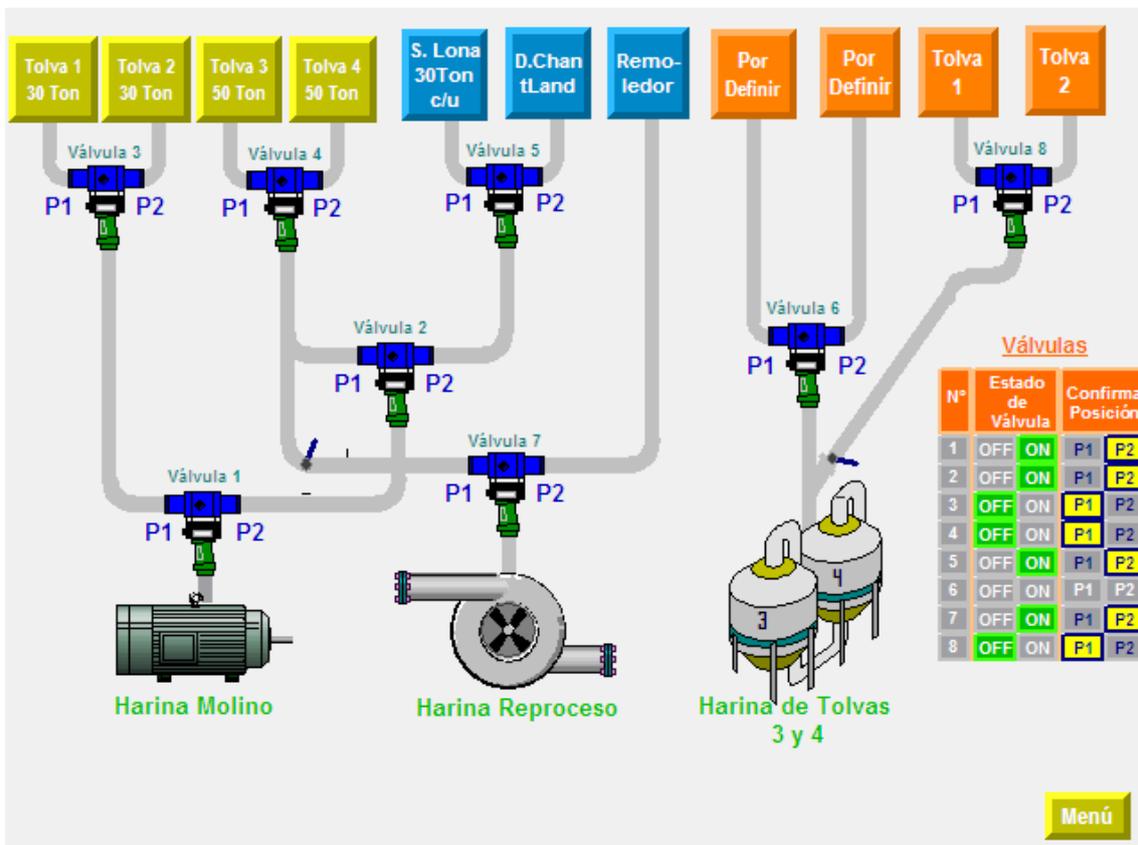


Figura 3 Pantalla direccionamiento de harina

1. Direccionamiento de Harina de Molino a Tolva 1

Al presionar el primer botón  el programa apaga la válvula 1 y la 3, como se notó en el cuadro de “Estado de Válvula” en pantalla, además de mostrar la dirección de la harina mediante el cambio de color de la tubería. Esto se muestra en la figura 4.

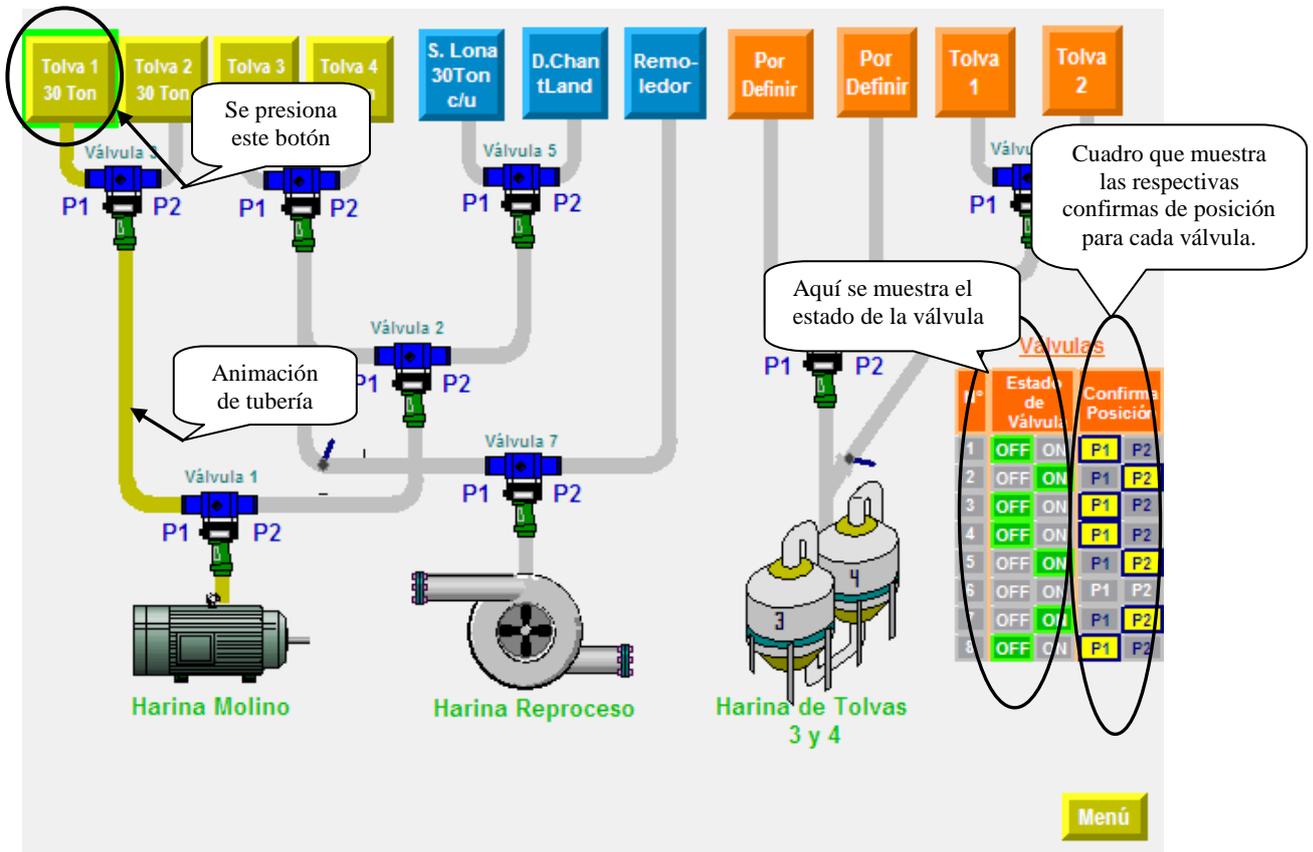


Figura 4 Pantalla al presionar el botón 1

Luego de presionar el botón, el programa espera 4 segundos y mediante las confirmas se asegura del apagado o encendido de las válvulas como se muestra en la figura 5.

➤ Variadores de Frecuencia

A continuación se muestra el funcionamiento de la pantalla donde se controlan los variadores de frecuencia de macerador, gusano a macerador, banda nixtamal, dosificador de cal y el de la retentora a cernedora 1. En la figura 5 se especifica la función de cada una de las partes en la pantalla.

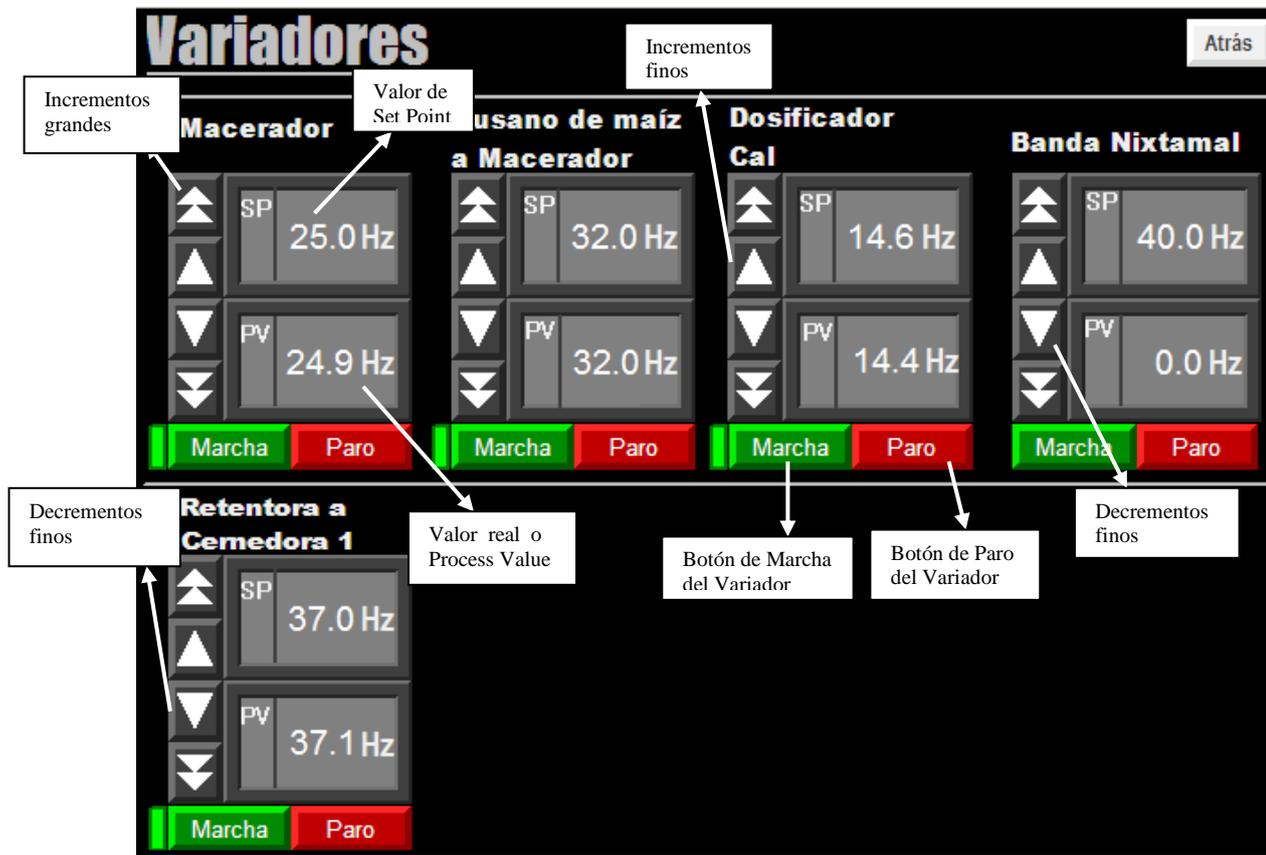


Figura 5 Descripción de la pantalla de control de los Variadores

Antes de poner en marcha los variadores desde la pantalla se debe de presionar el *Botón de marcha en la consola*. Luego de esto se presiona el botón “Marcha” en la pantalla. Al hacer esto aparece en la pantalla una luz verde que al lado del botón de marcha que se enciende y apaga indicando que se ha presionado el mismo. Esto se muestra en la figura 6 y 7.

Para asegurarse que el variador está funcionando correctamente el SP (Set Point) debe ser muy similar al PV (valor del proceso) como se muestra en la figura 7.



Figura 6 Se presiona el botón de marcha en la pantalla

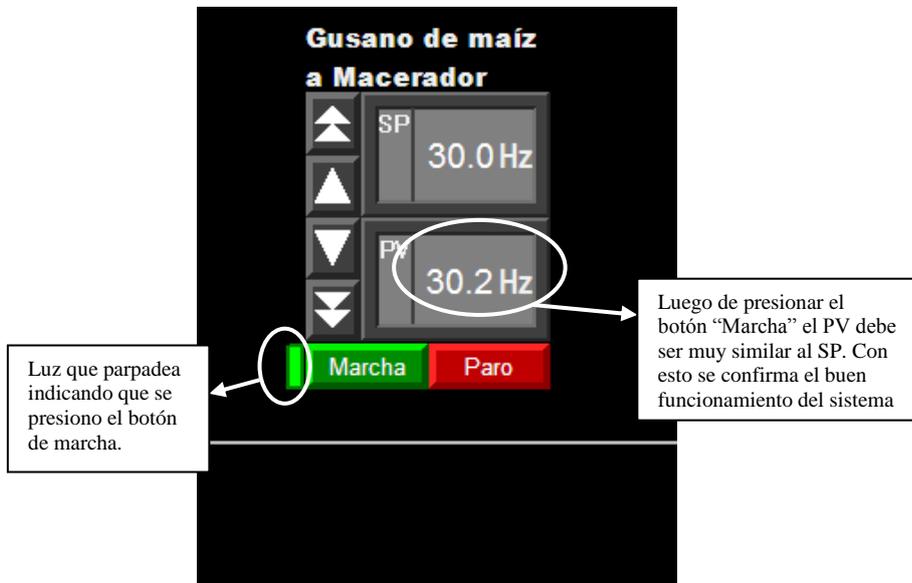


Figura 7 Indicadores de buen funcionamiento del sistema

➤ Dosificación automática de la cal

Mediante esta pantalla se controlan las variables que influyen en la dosificación automática de la cal. En el caso de la relación de los Kg Cal/Ton de maíz, ésta es cambiada mediante los botones mostrados en la parte superior derecha de la pantalla, con incrementos o decrementos grandes o finos dependiendo del botón presionado (figura 8), para las constantes de grCal/Hz y la de Kg maíz/Hz. El cambio solo se puede realizar por los molineros, por lo que para cambiar la constante se debe introducir una contraseña al presionar “Cambiar relación”.

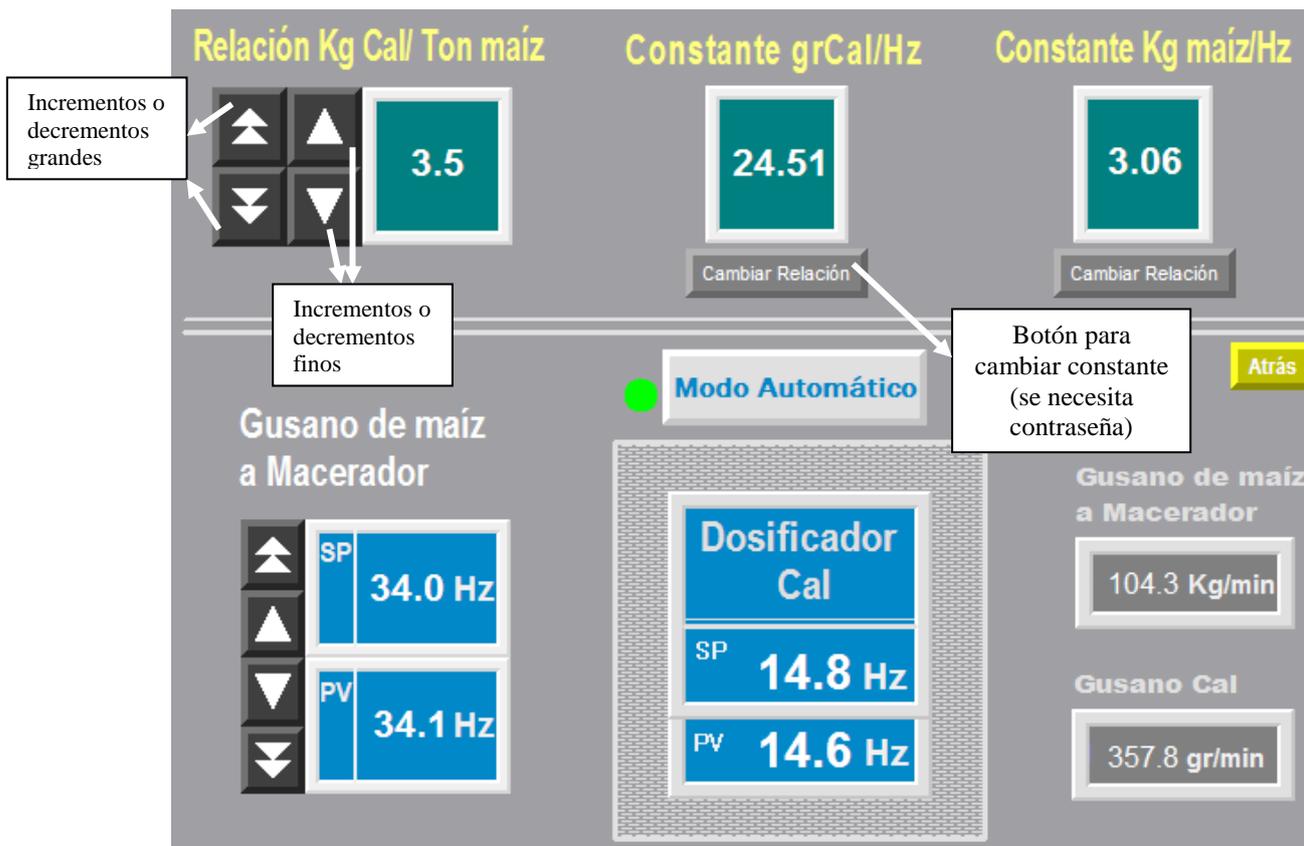


Figura 8 Pantalla principal para la dosificación automática de la cal

Además mediante esta pantalla se puede controlar el variador de frecuencia del gusano de maíz a macerador, de la misma manera como se controla en la pantalla de los variadores. También se pueden monitorear el flujo de kilogramos de maíz por minuto y el de los gramos de cal por minuto que entran al macerador.

Luego de haber colocado las relaciones y constantes correctas, lo único que se necesita realizar para empezar el proceso de dosificación automática, es presionar el botón de “Modo automático”.

➤ Monitoreo del Nivel del Silo de reposo

Esta pantalla se utiliza para monitorear el nivel del maíz en el silo de reposo. Además muestra a su izquierda el flujo de maíz en kilogramos por minuto y el flujo de cal en gramos por minuto.



Figura 9 Pantalla para mostrar nivel del silo de reposo

➤ Monitoreo de presiones

Mediante esta imagen se logra el monitoreo de las presiones de agua, aire y vapor.

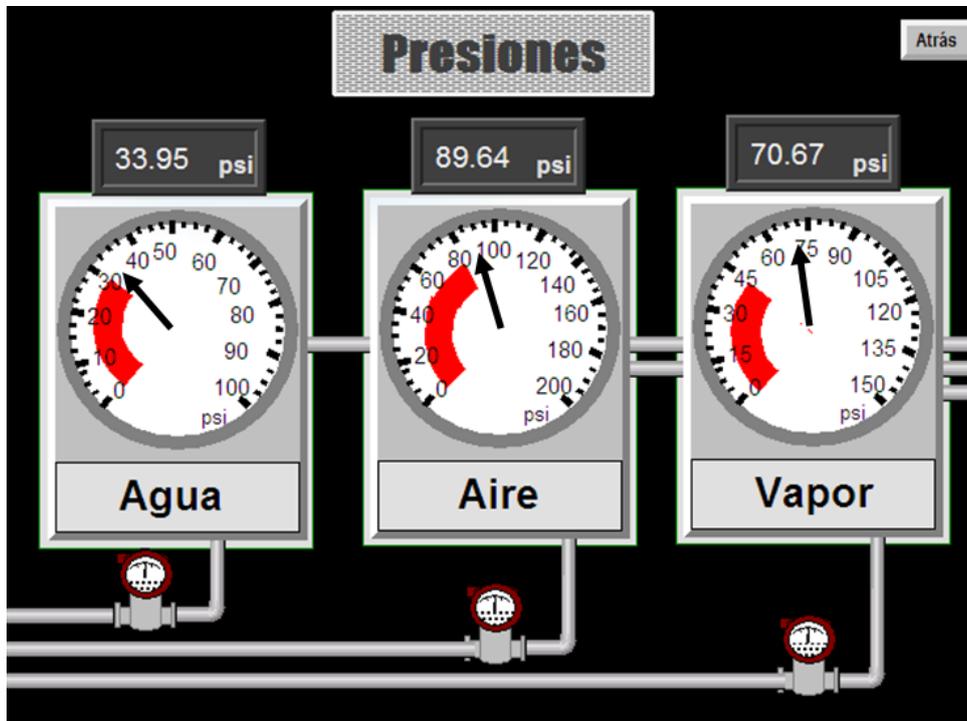


Figura 10 Pantalla para monitoreo de presiones.

A.3 Planos de módulos del PLC

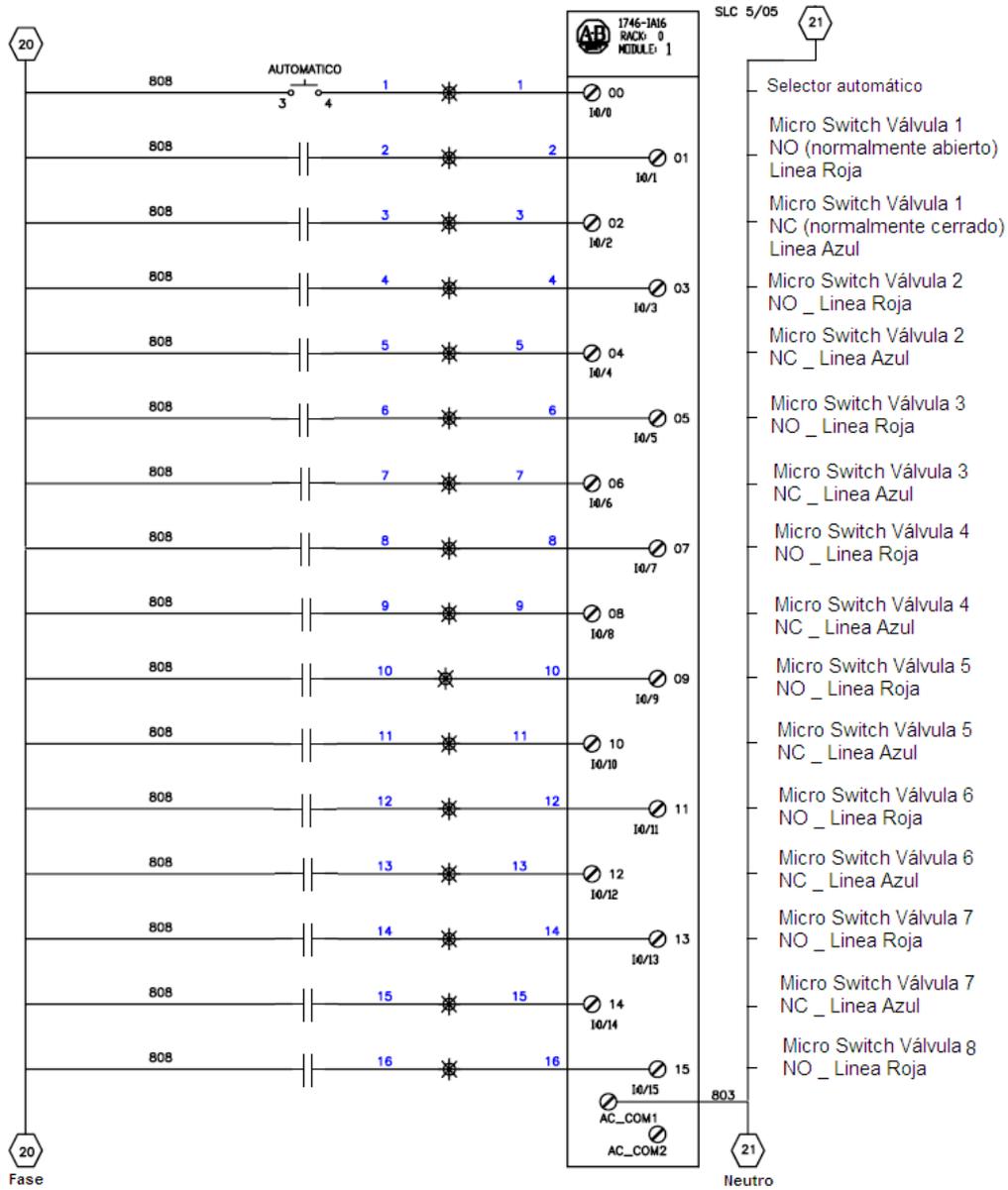


Figura A3.1 Conexiones módulo 1 – Entradas Discretas 1746 IA16

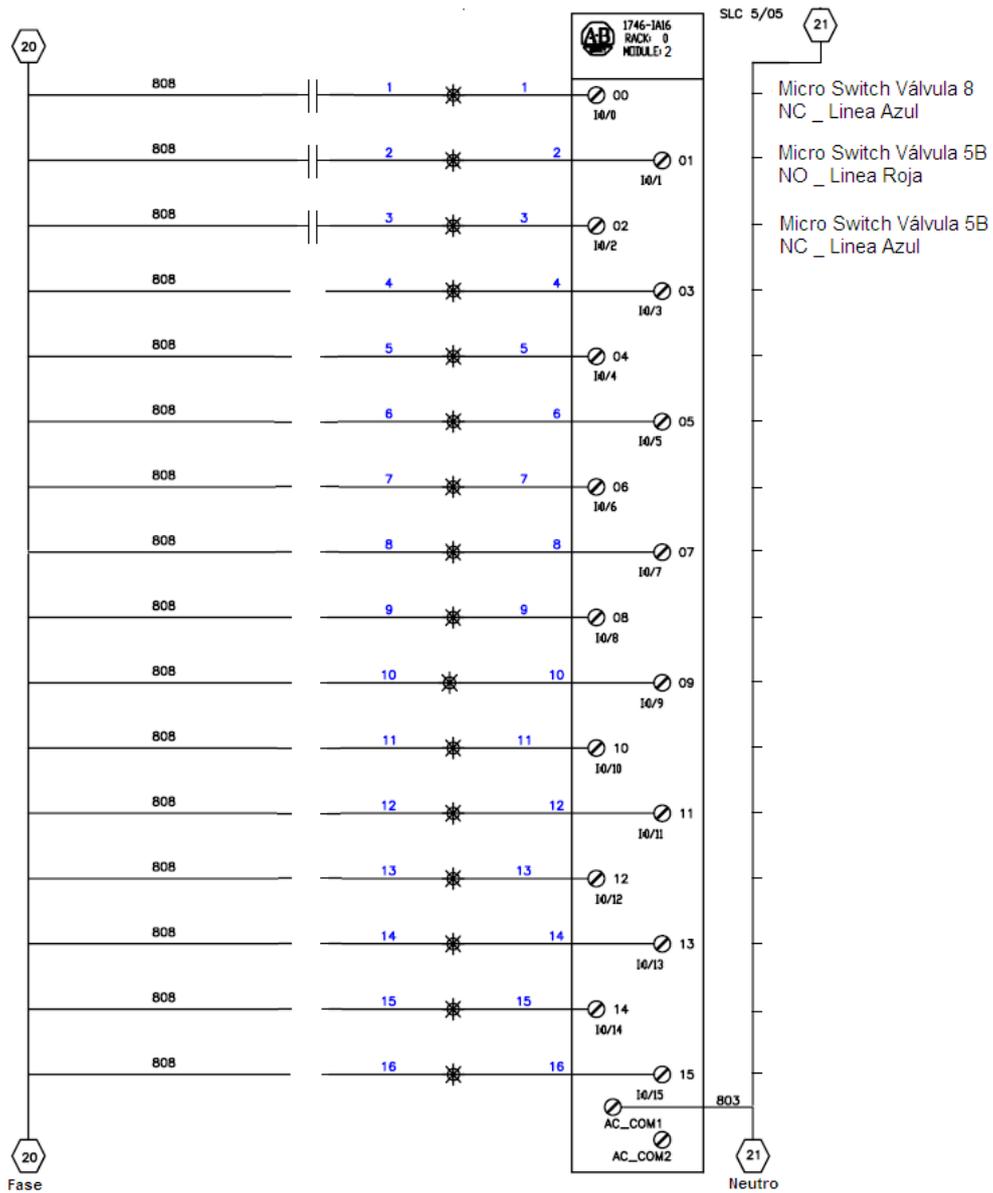


Figura A3.2 Conexiones módulo 2 – Entradas Discretas 1746 IA16

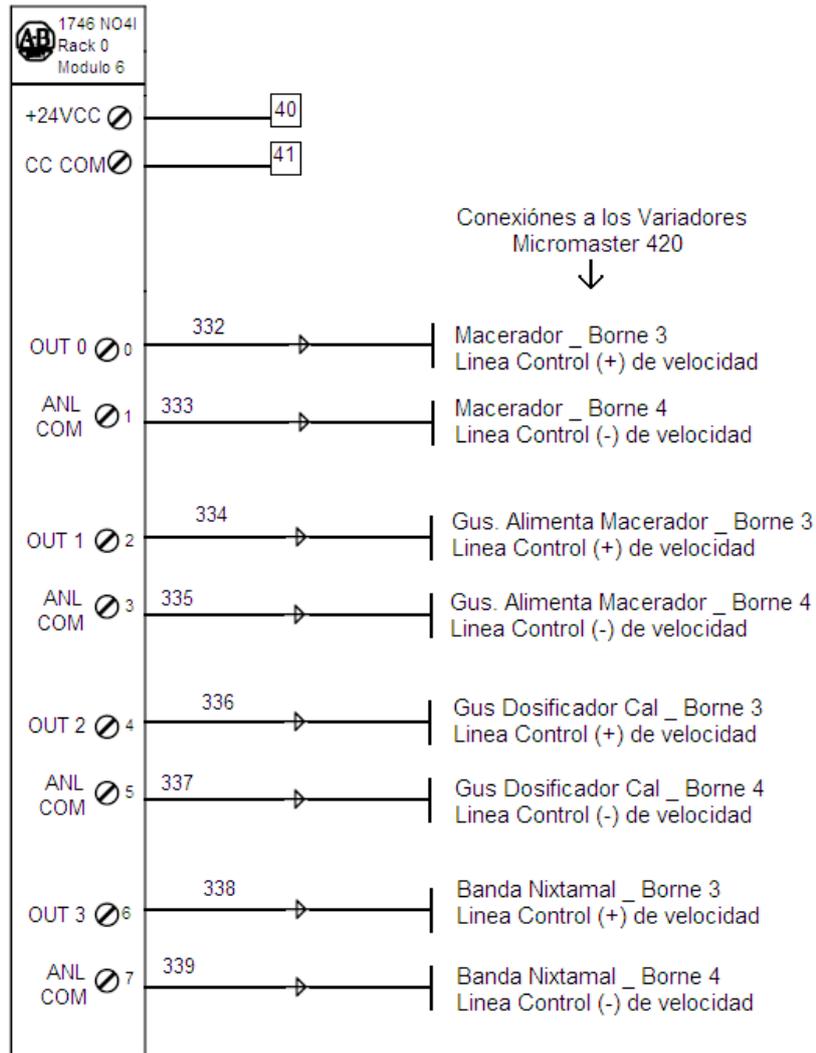


Figura A3.3 Conexiones módulo 6 – Salidas Analógicas 1746 NO4I

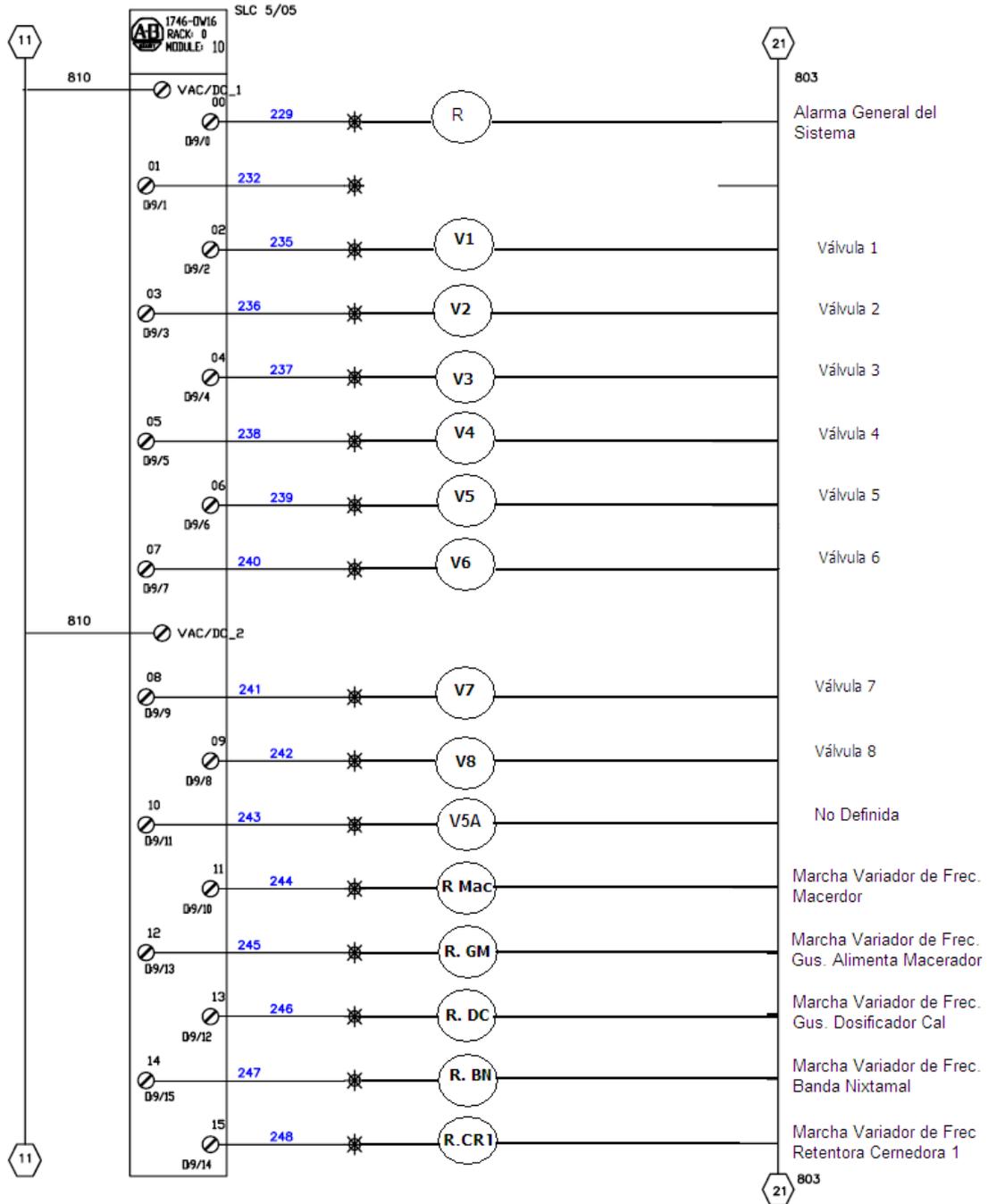


Figura A3.4 Conexiones módulo 10 – Salidas Discretas 1746 OW16

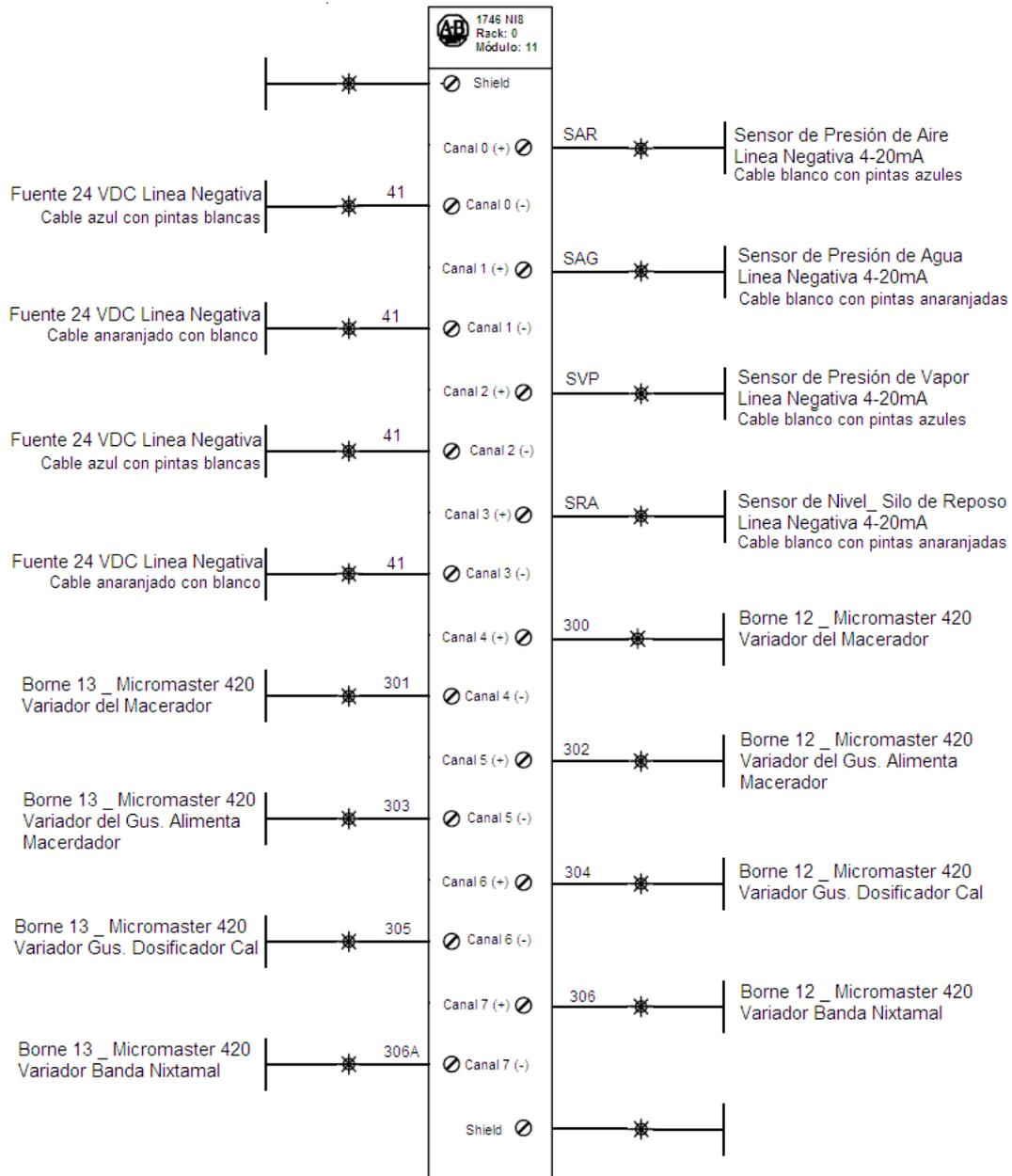


Figura A3.5 Conexiones módulo 11 – Entradas Analógicas 1746 NI8

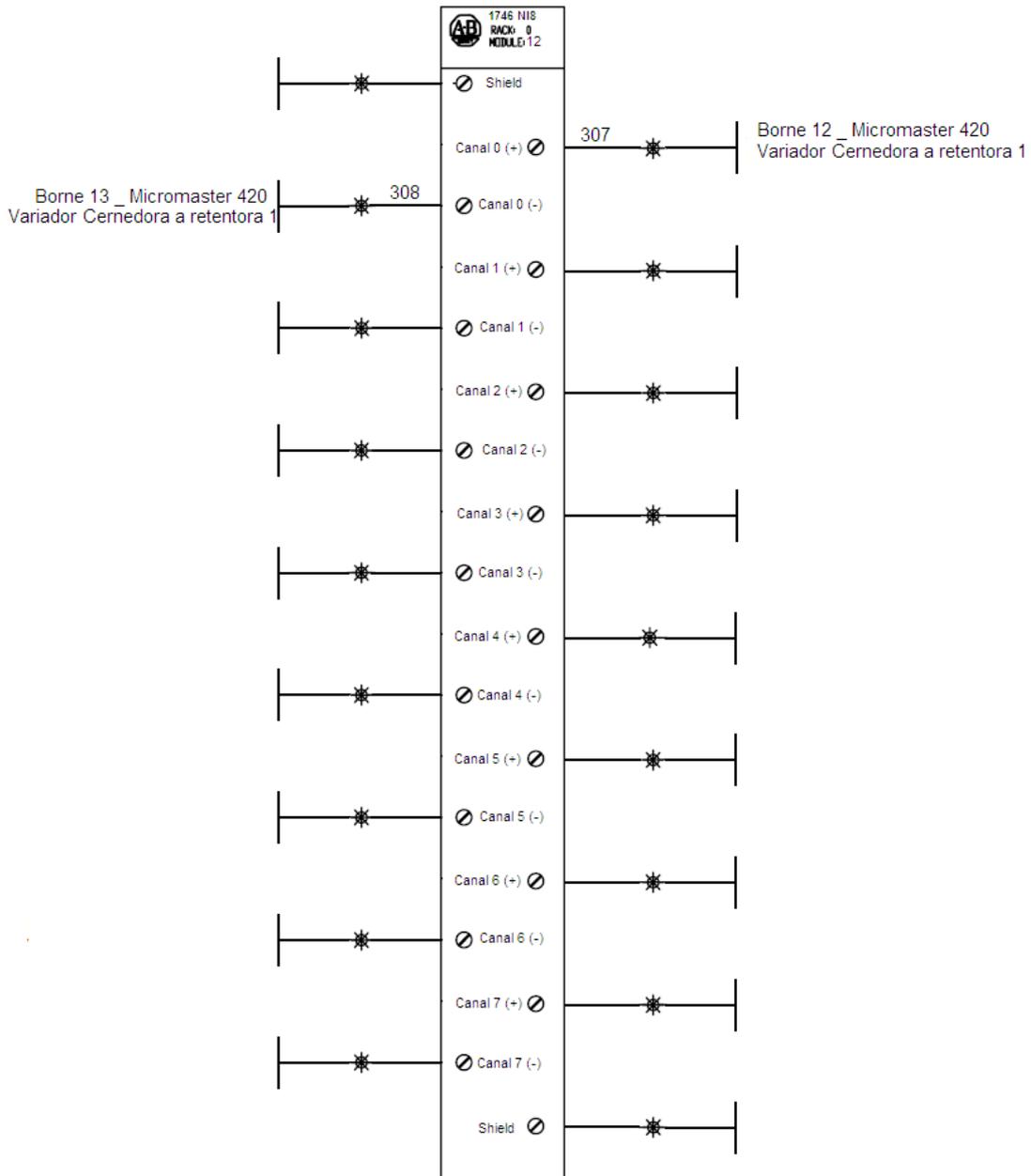


Figura A3.6 Conexiones módulo 12 – Entradas Analógicas 1746 NI8

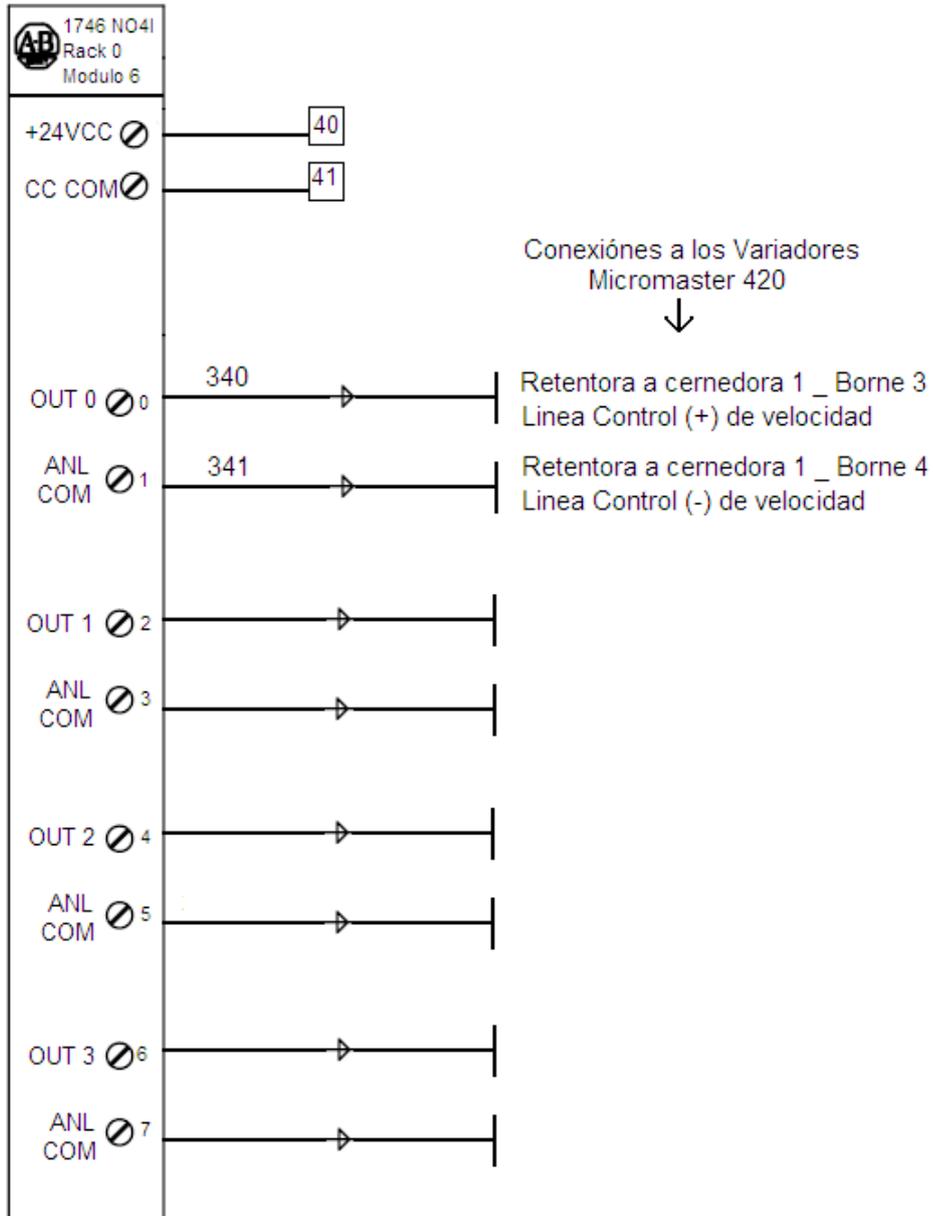


Figura A3.7 Conexiones módulo 13 – Salidas Analógicas 1746 NO4I