



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Facultad de Ciencias e Ingeniería



**Automatización del sistema de control y monitoreo de
una autoclave para el proceso de vulcanización del
caucho en calzado de lona**

Tesis para optar el título de Ingeniero Electrónico

Presentado por:
Javier Eduardo Reyes Sánchez

Lima - PERÚ

2008

RESUMEN

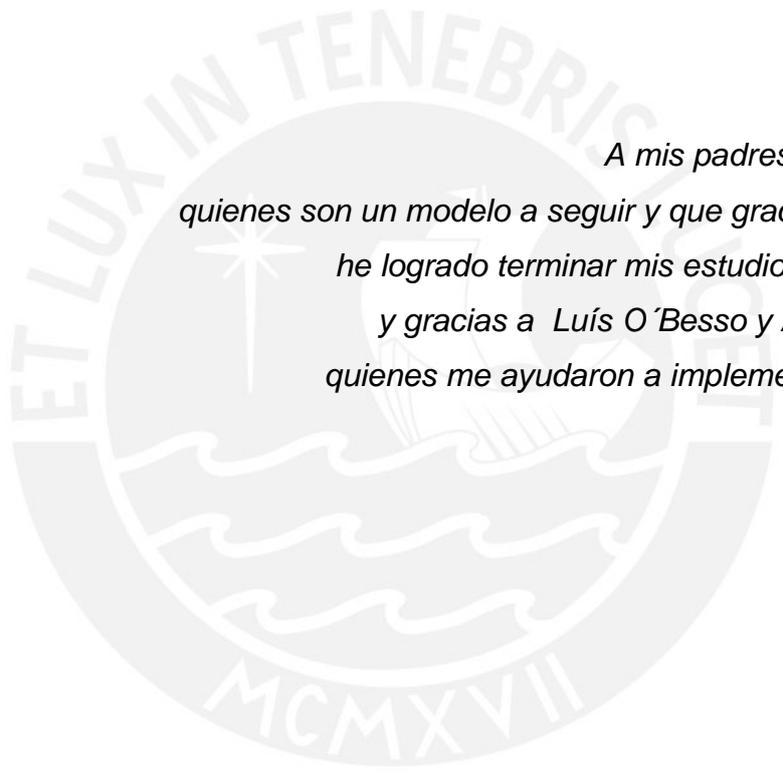
La mediana empresa Industrial Cóndor SAC, es testigo del rápido crecimiento del mercado de calzado y de cómo las empresas que forman parte de este grupo empresarial siguen empleando controles manuales para operar las distintas máquinas que forman parte de su línea de producción. Ante esto, la empresa Industrial Cóndor busca renovar y automatizar sus procedimientos y maquinarias, para poder seguir destacando su producto en el mercado nacional.

Por lo tanto, al tener un mercado cada vez más competitivo, la búsqueda de tecnología que sea capaz de reemplazar y mejorar las operaciones manuales ejecutadas por los trabajadores en las plantas industriales es cada vez mayor. El desarrollo de este proyecto busca centrar sus objetivos en la Autoclave, una de las máquinas que más trabajo tiene en el transcurso del día, siendo ésta la última etapa del proceso de producción de zapatillas de lona y donde se desarrolla el proceso de cura del caucho.

El objetivo general de esta tesis es diseñar e implementar un equipo que sea capaz de controlar la presión, temperatura y el tiempo, permitiendo una interacción automática de los actuadores para lograr obtener niveles de consignas adecuados dentro de la autoclave, teniendo en cuenta un diseño simple y amigable para que cualquier trabajador de la empresa pueda manipularlo.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos. En el primero, se define y se detallan los procedimientos de vulcanización para luego dar a conocer los parámetros a controlar en la autoclave, el procedimiento empleado por la empresa y la problemática de este sistema. En el segundo se muestran los diferentes tipos de tecnologías y metodologías empleadas en la automatización de autoclaves que ayudará a elaborar un modelo teórico del sistema requerido. El siguiente capítulo se presenta la hipótesis y los objetivos, además se planifica las etapas a seguir para el desarrollo del trabajo. El cuarto y último capítulo incluye todo diseño e implementación del proyecto, se detallan los componentes seleccionados, la programación y la integración del sistema.

Los resultados mostrados en este trabajo muestran una automatización completa de la autoclave a nivel de campo, y un sistema de supervisión que ayuda al trabajador a controlar fácilmente la máquina. Además se corrobora el buen funcionamiento de los controles planteados inicialmente.



*A mis padres Javier y Nelly,
quienes son un modelo a seguir y que gracias a su apoyo
he logrado terminar mis estudios universitarios
y gracias a Luís O´Besso y Antonio Rivera,
quienes me ayudaron a implementar esta tesis.*

INDICE

Pag.

INTRODUCCION

CAPITULO 1: PROCESO DE VULCANIZACION DEL CALZADO EN AUTOCLAVES Y LA PROBLEMÁTICA DE LA ACTUAL TECNOLOGIA

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1 | Introducción | 1 |
| 1.2 | Definición de vulcanización | 1 |
| 1.3 | Procedimientos que influyen en un adecuado curado del calzado | 2 |
| 1.4 | Parámetros a controlar dentro de una autoclave | 3 |
| 1.5 | Curado de calzado en autoclaves | 5 |
| 1.5.1 | Tecnología del procedimiento empleado | 5 |
| 1.5.2 | Introducción del procedimiento empleado | 6 |
| 1.5.3 | Problemas encontrados del método actual | 10 |

CAPITULO 2: AUTOMATIZACION DE AUTOCLAVES A NIVEL INDUSTRIAL

| | | |
|---------|--|----|
| 2.1 | Introducción | 11 |
| 2.2. | Automatización avanzada de autoclaves | 11 |
| 2.2.1 | Sistemas de control en la actualidad | 12 |
| 2.2.2 | Metodologías para la implementación de sistemas de vulcanización | 18 |
| 2.3 | Síntesis sobre el asunto de estudio | 19 |
| 2.4 | Componentes tecnológicos empleados en el control de autoclaves | 20 |
| 2.4.1 | Sensores | 21 |
| 2.4.1.1 | Sensores de Temperatura | 21 |
| 2.4.1.2 | Sensores de Presión | 23 |
| 2.4.2 | Controles empleados | 24 |
| 2.4.3 | Controladores Lógicos Programables | 25 |
| 2.5 | Modelo Teórico | 25 |

CAPITULO 3: APLICACIÓN DEL CONTROL DE AUTOCLAVES PARA EL PROCESO DE VULCANIZACION

| | | |
|-------|---------------------------------|----|
| 3.1 | Introducción | 27 |
| 3.2 | Hipótesis de la investigación | 27 |
| 3.2.1 | Hipótesis principal | 27 |
| 3.2.2 | Hipótesis Secundarias | 28 |
| 3.3 | Objetivos de la investigación | 28 |
| 3.3.1 | Objetivo General | 28 |
| 3.3.2 | Objetivos específicos | 28 |
| 3.4 | Universo y Muestra | 29 |
| 3.5 | Metodología de la investigación | 29 |

CAPITULO 4: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PARA EL CONTROL DE LA AUTOCLAVE

| | | |
|---------|---|----|
| 4.1 | Investigación preliminar | 31 |
| 4.2 | Diseño del sistema | 31 |
| 4.2.1 | Diseño de automatización e instrumentación | 31 |
| 4.2.2 | Instrumentación y Actuadores | 35 |
| 4.2.2.1 | Medición de Temperatura | 35 |
| 4.2.2.2 | Medición de Presión | 37 |
| 4.2.2.3 | Válvulas Solenoides | 39 |
| 4.2.2.4 | Relés de Estado Sólido (SSR-Solid State Relay) | 40 |
| 4.2.3 | Control Básico | 41 |
| 4.2.3.1 | Definición del número de entradas | 42 |
| 4.2.4 | Supervisión | 47 |
| 4.2.4.1 | Protocolo Modbus | 48 |
| 4.3 | Programación del PLC y el sistema de supervisión | 49 |
| 4.3.1 | Introducción al Gráfico Funcional de Control de Etapas y Transiciones | 50 |
| 4.3.2 | Programación del Autómata | 51 |
| 4.3.2.1 | Control de Presión (Estado 4 al Estado 9) | 54 |
| 4.3.2.2 | Control de Tiempos (Elemento 10) | 56 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3.2.3 Control de Temperatura (Estado 11) | 57 |
| 4.3.3 Programación de la Interface Hombre-Máquina | 60 |
| 4.3.3.1 Página de Aplicación y Alarmas | 61 |
| 4.4 Diseño Eléctrico | 63 |
| 4.4.1 Características eléctricas de las resistencias | 63 |
| 4.4.2 Características eléctricas del motor | 67 |
| 4.4.3 Fuente de alimentación | 68 |
| 4.4.4 Actuadores e indicadores | 72 |
| 4.5 Pruebas | 72 |
| 4.6 Costos de la Implementación | 78 |
| CONCLUSIONES | 79 |
| RECOMENDACIONES | 81 |
| FUENTES | 82 |



INTRODUCCION

En la industria peruana es muy común observar pequeños talleres que han ido creciendo convirtiéndose en pequeñas, medianas y con el pasar de los años en grandes empresas que aportan al desarrollo industrial de nuestro país. Muchos de estos talleres gracias a la mejora de la calidad del producto que fabrican han crecido rápidamente adquiriendo un mayor número de máquinas y contratando por tal motivo a un mayor número de trabajadores para abastecer el nivel de demanda. Como consecuencia de este rápido crecimiento, en la mayoría de los casos dichas empresas no logran mantener un orden en la línea de producción o continúan utilizando las diversas máquinas que en un principio los ayudaron a salir adelante, sin tener en consideración que durante este periodo han sido optimizadas y automatizadas mejorando en muchos casos la calidad y la cantidad del producto que procesan.

Es muy común encontrar dentro las fábricas, máquinas de última generación junto a máquinas muy antiguas las cuales siguen formando parte del círculo de producción. Es en estos casos, que los empresarios buscan que sus diferentes máquinas antiguas sean renovadas para que el nivel de producción crezca y sea de mejor calidad y recurren a la automatización de las máquinas que antes eran controladas manualmente.

En Industrial Cóndor SAC, empresa dedicada a la fabricación de calzado deportivo de lona y de cuero ubicado en la zona norte de la ciudad de Lima, puede verse la mixtura de maquinaria antigua con nueva dentro de la línea de producción.

Por tal motivo se ha empezado el trabajo de automatización de las diversas máquinas antiguas como calandrias, fajas, prensas, inyectoras y una autoclave. Esta última por ser de mayor utilización dentro del proceso de fabricación del calzado de lona se ha priorizado ante las demás máquinas. El uso de la autoclave indica el último paso en la fabricación del calzado y es en

ella donde se desarrolla el proceso de vulcanización del caucho, tema del presente estudio.

La vulcanización, o cura del caucho, es un proceso químico llamado entrecruzamiento en la cual los grupos de moléculas del polímero están fuertemente unidas gracias a puentes atómicos, cambiando la estructura del caucho y volviéndolo un material con mayor dureza y resistencia al calor. Con la vulcanización se incrementa el esfuerzo tensil, la dureza, la resistencia a la abrasión y por consiguiente disminuye la elongación, compresión permanente y la solubilidad. La resistencia a la tensión y al rasgado muestra un valor óptimo, debido a los cambios producidos por el grado de entrecruzamiento. Todas estas características que la vulcanización brinda son gracias a los diversos compuestos químicos, acelerantes y antioxidantes, que se añaden al caucho y que son sometidos a un nivel adecuado de temperatura, presión y tiempo de trabajo.

La autoclave en donde se desarrolla la cura del caucho es actualmente controlada básicamente por elementos mecánicos antiguos que no brindan un control adecuado de los tres parámetros importantes para una vulcanización óptima.

La temperatura es uno de los parámetros críticos a controlar dentro de la autoclave, con un bajo nivel de temperatura la cura tomaría mucho tiempo y no alcanzaría los niveles adecuados de vulcanización teniendo un producto crudo.

La presión, el segundo parámetro a controlar en la autoclave, a bajas presiones el material puede deformarse formando burbujas de aire debido a que también es sometido a calor ya que éste tiende a expandirse. Y la excesiva presión a la cual se somete el material puede hacer que el caucho se deforme y se quiebre.

El tiempo de trabajo, el tercer parámetro a controlar, esta relacionado con la temperatura a la cual se somete el material. Cuando la temperatura de

vulcanización se incrementa, el tiempo de cura tiende a disminuir. Por el contrario, cuando la temperatura de vulcanización decrece, el tiempo necesario para lograr un perfecto estado de cura es mayor.

Tanto la presión como el tiempo de trabajo dependerán del tipo de producto que se va a fabricar.

Actualmente es posible encontrar una completa automatización de autoclaves que incluyen la carga y descarga del producto que se vulcaniza en la autoclave así como el control y el monitoreo de la temperatura y la presión interna de la cámara. Dentro de las opciones tecnológicas que se han desarrollado, tanto para el control de temperatura o presión, es posible encontrar controladores lógicos programables (PLC) que trabajen bajo algoritmos PID y On-Off. Estos controladores emplean un sistema de adquisición de datos y adecuan una interface gráfica para que el usuario pueda monitorear y controlar la autoclave de forma remota. Además muchos de los sistemas desarrollados tienen como objetivo controlar a la vez un número ilimitado de autoclaves bajo un control SCADA de tal forma que puedan reportar la calidad del producto fabricado.

El objetivo del presente trabajo es diseñar e implementar un sistema automatizado de medición y control de la temperatura y la presión, de tal manera que se alcancen los valores establecidos para una óptima vulcanización del caucho en la autoclave, y cuya implementación reemplace al actual tablero de control.

En el Capítulo 1 se define el proceso de vulcanización, los distintos procedimientos que se emplean en la actualidad para alcanzar la fase de cura del caucho, además de las características que adquiere el caucho al ser curado. También se podrá encontrar la descripción de los tres parámetros a controlar. Así mismo, se describe la tecnología y el procedimiento empleado actualmente para el control de la autoclave y finalmente los problemas encontrados al trabajar con este sistema.

En el Capítulo 2 se presenta el estado del arte, mostrando los diferentes tipos de automatización para autoclaves. Se muestran y se explican las distintas metodologías empleadas en el proceso de vulcanización. Mas adelante se detallan los distintos dispositivos que se encuentran en el mercado que servirán para la medición de las variables críticas de este trabajo. Así mismo, se describen posibles controles que pueden ser utilizados para la automatización de la autoclave. Finalmente se elabora el modelo teórico del sistema de tal manera que cumpla con los requerimientos.

En el Capítulo 3 se presenta el universo y muestra de la investigación, más adelante se presenta la hipótesis principal de este trabajo la cual luego se disgrega en hipótesis secundarias; así mismo se expone el objetivo principal y los objetivos secundarios de la tesis. Posteriormente se detalla el procedimiento a seguir para el análisis de los datos y el diseño del sistema.

En el Capítulo 4 se detalla el desarrollo del nuevo sistema que se propone para el control de la autoclave. Primero se describe la forma de trabajo de la máquina para luego, basándonos en la pirámide de automatización, se indiquen los instrumentos y actuadores empleados para este sistema. Luego se describe el control básico empleado detallando cada una de las características del controlador empleado. Posteriormente, se podría encontrar la comunicación y la supervisión que se añade a este sistema y finalmente se explica la programación empleada para realizar tanto el control básico como el sistema de supervisión.

Para el desarrollo de este trabajo fue necesaria en primer lugar una etapa de observación y de análisis para entender el funcionamiento de la maquina y el proceso que se lleva acabo dentro de ella. Posteriormente fue necesario determinar los requerimientos y características de los equipos para garantizar autonomía y funcionalidad del diseño. La siguiente etapa, consistió en el diseño de la estrategia para controlar la temperatura, presión y el tiempo de la

autoclave. Continuando con el desarrollo de este trabajo se procedió a la investigación de los dispositivos, sistemas de comunicación, interfases, instrumentos y actuadores necesarios para llevar a cabo el control propuesto. En la etapa siguiente se hizo el diseño eléctrico – electrónico para controlar los dispositivos seleccionados y de esta manera poder realizar las pruebas por etapas. Luego con las pruebas realizadas se procedió a mejorar el trabajo buscando corregir cualquier tipo de error encontrado en la etapa de prueba.



CAPITULO 1

PROCESO DE VULCANIZACION DEL CAUCHO EN AUTOCLAVES Y LA PROBLEMÁTICA DE LA ACTUAL TECNOLOGIA

1.1 Introducción

En el presente capítulo se define el proceso de vulcanización empleado actualmente en industrias que trabajan con autoclaves o prensas y que tienen como materia prima al caucho natural o artificial. Luego se detallan dos metodologías empleadas para lograr un curado óptimo. Posteriormente, una vez claro el proceso a automatizar, se describe los tres parámetros a controlar en la autoclave. Finalmente, se detalla la tecnología empleada y el proceso completo que utiliza la empresa Industrial Cóndor SAC.

1.2 Definición de vulcanización

Para poder entender el propósito de esta investigación, es necesario dar una explicación del proceso que se lleva a cabo dentro de la autoclave. Se sabe que en su estado natural, el caucho tiene varias propiedades indeseables, cuando se calienta se hace suave y pegajosa, cuando se enfría se endurece y rompe, y cuando envejece produce un olor desagradable. Para evitar estas desventajas y dotarlo de características útiles, como dureza, elasticidad y resistencia a la tracción, el caucho debe de ser vulcanizado. La vulcanización es una forma de polimerización que crea una estructura cristalina tridimensional de gran dureza y resistencia; se consigue estableciendo uniones químicas entre las moléculas del elastómero (polisopreno para el caucho natural).

El agente vulcanizador más antiguo es el azufre, pero la velocidad de vulcanizado trabajando solo con este compuesto sería muy lenta y necesitaría temperaturas muy elevadas, por lo que se utilizan aceleradores y activadores que permiten trabajar a menor temperaturas y durante menos tiempo. En el proceso de producción de los objetos de goma, al caucho natural se le añaden diversas sustancias químicas para mejorar el procesamiento y para dotar al producto final de las características físico-químicas y mecánicas deseadas.

Entre estos aditivos se encuentran los aceleradores, activadores, cargas, antioxidantes, antiozonantes y plastificantes. La misma importancia tiene el método y el equipo empleado para realizar la vulcanización. La elección es amplia y depende de la forma y de la demanda del artefacto que será vulcanizado y los equipos existentes para obtener los resultados deseados de la forma más eficaz y eficiente posible [26].

La velocidad con que la vulcanización o cura ocurre es directamente proporcional a la cantidad de calor y energía aplicada. Ya que la mayoría de los procesos de vulcanización son dependientes del calor, se puede concluir que cuanto más alta es la temperatura de vulcanizado, menor será el tiempo empleado. Y por lo tanto a menores temperaturas, mayor será el tiempo empleado.

Finalmente, podemos decir que la vulcanización del caucho puede ser definida como el proceso en la cual la reacción entre el polímero y el azufre da como resultado un polímero de mayor estructura con un incremento de las propiedades elásticas del polímero original, el cual mantiene estas propiedades sobre un amplio rango de temperatura [25].

1.3 Procedimientos que influyen en un adecuado curado del calzado

Las condiciones de cura podrían variar en forma muy amplia según sea la clase de vulcanizado que se necesita y los medios que se disponga. Se deberán calcular de antemano muchos factores, entre ellos, la dureza requerida del producto, la resistencia al desgarre, la abrasión, el agrietamiento a la flexión, su espesor, la cantidad de trabajo que es necesario realizar y el tratamiento de las cargas del caucho después del procedimiento de cura.

Existen dos procedimientos admitidos para manejar el aspecto térmico referente al espesor de los artículos de caucho:

En el primero se procede en forma escalonada o por curas en fases, en el cual se utiliza más de una temperatura; se basa en elevar la temperatura de la masa del artículo hasta una temperatura próxima a la de vulcanización (por ejemplo, hasta unos 120° C), antes de aplicar un calentamiento adicional hasta alcanzar la temperatura de cura. Aun cuando más costoso existe un procedimiento técnico mejor para lograr esta finalidad y consiste en precalentar los artículos fuera de los moldes por medios dieléctricos, los que proporcionan un calentamiento uniforme a toda la masa del artículo.

El segundo procedimiento se basa en producir el efecto contrario, es decir, un enfriamiento externo lento, en lugar de un calentamiento lento. Se interrumpe el suministro de energía calorífica antes de terminar la cura, sujetándose a presión los artículos dentro de los moldes, sin la existencia de corrientes de aire y otros factores que enfríen, mientras que la energía calorífica se introduce en el seno de la masa. Este procedimiento de cura se denomina “de absorción”.

Así como los materiales de caucho aumentan en forma muy lenta su temperatura durante su cura, de igual manera son renuentes a disiparla; después de que se ha sacado el artículo del equipo de cura (autoclave), el procedimiento de cura durará hasta que dicho aumento de temperatura se anule. Esto ofrece ventajas evidentes, ya que en el caso de curas a temperaturas superiores, solo una pequeña parte de la misma se realiza en el equipo, y el resto fuera de él

1.4 Parámetros a controlar dentro de una autoclave

Es necesario explicar los parámetros a controlar, dentro de la autoclave, necesarios para alcanzar las características finales del caucho ya que estos afectan directamente en el curado de las suelas:

- 1) Temperatura de curado:** El periodo total de vulcanización de las suelas se descompone en dos intervalos:

- a. El intervalo que se emplea para calentar los artículos hasta la temperatura de cura.
- b. El intervalo que se emplea para curarlos una vez que se ha alcanzado la temperatura de vulcanización.

Este último se establece para una temperatura fija, y, por consiguiente, la eficiencia relativa de las diversas clases de equipo dependerá del tiempo economizado durante el calentamiento previo.

En el caso de la autoclave a controlar el tiempo de precalentamiento se da desde los 108°C hasta los 136°C, temperatura en la cual el calzado entra en la etapa de curado, posteriormente el calzado es retirado de la autoclave para ser enfriado con ayuda de ventiladores hasta terminar el periodo de vulcanización.

En muchos procesos de calentamiento eléctricos a presión, un control simple ON/OFF por medio de termostatos es usado para el control de la temperatura. Un control más exacto puede ser alcanzado gracias a un control de temperatura proporcional, proporcional integral, o proporcional integral derivativo.

- 2) Presión de curado:** Cantidad de presión que requiere la autoclave para realizar un adecuado proceso de vulcanización. La presión de vapor ingresa a la máquina, cuando esta ya se encuentra cargada y sin el encendido de las resistencias, es por esto que en primera instancia la temperatura cae, debido a que enfría el material y el ambiente que lo rodea. Se necesita disponer de un periodo de cura a presión, ya que de otra manera los productos pueden resultar porosos o pueden “hincharse”.
- 3) Tiempo de trabajo:** El tiempo de trabajo de la autoclave se considera desde el momento en que se encienden las resistencias calefactores y el ventilador, que ayuda a activar la circulación del vapor, hasta el momento

que ambos son desactivados El tiempo de curado puede variar de acuerdo al tamaño del calzado y al material que lo acompaña. La temperatura y la presión están directamente relacionadas con el tiempo de trabajo de la máquina, sino se desean que existan desperfectos en el calzado, el tiempo de la máquina debe controlarse adecuadamente. Los intervalos en los cuales el proceso de vulcanización se compone son supervisados no solo en grados de temperatura sino también en los periodos de tiempo que estos deben durar.

1.5 Curado de calzado en autoclaves

En los puntos anteriores se pudo aprender la manera como se puede llegar a un vulcanizado de calzado adecuado controlando tres parámetros importantes, estas metodologías sirven de base para los procedimientos empleados en las empresas que se dedican a la producción de calzado. Por lo tanto, para entender el desarrollo de este proyecto, es de suma importancia introducir al lector tanto el las tecnologías que se emplean así como una pequeña introducción del proceso de vulcanización que desempeña la empresa Industrial Cóndor SAC.

1.5.1 Tecnología del procedimiento empleado

La tecnología usada actualmente en Industrial Cóndor SAC para el proceso de vulcanización dentro de una autoclave consta de:

- Válvulas manuales tipo globo para el ingreso y salida del aire
- Resistencias calefactoras
- Ventilador, cuya función es hacer circular el aire dentro de la autoclave
- Dos termocuplas tipo J
- Un manómetro para medir la presión interna de la cámara
- Dos controladores de temperatura tipo ON/OFF
- Un control digital de tiempos de trabajo.
- Una Sirena (indica que el trabajo ha terminado)
- Un Timbre (indica que se debe de abrir la puerta de la autoclave)

- Dos sensores de presencia (fin de carrera y magnético)

1.5.2 Introducción del procedimiento empleado (Véase Gráfico N° 1 Procedimiento de Vulcanización en Industrial Cóndor SAC)

Para poder controlar la autoclave se ha realizado una investigación del proceso de vulcanización del caucho utilizado en las zapatillas. Según lo visto en la industria de calzado, la autoclave trabaja a temperaturas, tiempos y presiones distintas dependiendo del tipo de calzado que ingresa a la máquina, entre estos debe diferenciarse: talla, forma, material que acompaña al caucho (tela, plástico, etc.) y los diferentes químicos que se añaden al caucho para obtener las propiedades deseadas.

La investigación necesaria para la automatización de la autoclave comienza con el estudio del proceso que realiza el trabajador al maniobrar dicha máquina, desde el momento que carga la misma con dos carros que tienen la capacidad de portar 36 pares de zapatillas cada uno, hasta la salida del aire encerrado en la cámara y finalmente al descargar el calzado. Debido a diversos factores como lentitud de la línea de trabajo, falta de material y principalmente al trabajo de distintas tallas o modelos de calzado; estos carros ocasionalmente no son llenados en su totalidad. Es por esto que el operario deberá especificar la cantidad de pares de zapatillas que ingresan en la autoclave para así llevar un control adecuado de la cantidad producida diariamente.

Como primer paso, el operario se encarga de llenar los carros con la cantidad de pares producida cada 35 minutos, se asume que la cantidad de carga promedio de la autoclave es de 72 pares, es decir, dos carros completamente llenos.

Una vez que la autoclave ha sido cargada, y cerrada la puerta herméticamente, el operario como segundo paso, procederá a abrir la válvula de entrada de aire proveniente de un tanque pulmón especial para la autoclave, la válvula continuará abierta hasta el momento que el manómetro indique

aproximadamente 3.5 Kg./cm^2 , en ese instante el operario cierra la válvula de entrada.

Debemos destacar que la autoclave aun cuando no tiene carga en su interior (antes de iniciar el proceso de vulcanización) y la puerta está cerrada, el interior de la misma almacena una cantidad de aire a temperaturas elevadas de aproximadamente $130 \text{ }^\circ\text{C}$, esto debido a la inercia térmica que se origina por el constante encendido de las resistencias calefactoras durante todo el día. Esto indica que la temperatura interna de la autoclave ira aumentando con el transcurso de las horas. Se ha podido observar que a consecuencia de la entrada de aire, la temperatura interna de la máquina tiende a caer rápidamente hasta un valor aproximado de $110 \text{ }^\circ\text{C}$.

Como tercer paso se selecciona el tiempo de trabajo total del proceso, para la mayoría de los casos, se observa que este tiempo es fijado en 32 minutos aproximadamente. Anteriormente el selector de un temporizador mecánico es el medio por el cual se elegía este tiempo, actualmente consta con un microcontrolador Atmega8l que se encarga de seleccionar el tiempo necesario para el proceso según el número de pares ingresados.

El tablero de control consta de dos controladores de temperatura tipo ON-OFF en el cual se selecciona la consigna a la cual se desea llegar, con un rango de error de 2°C a más.

El cuarto paso consta del encendido de las resistencias calefactores y del ventilador interno hasta la culminación del tiempo de trabajo. En este instante el proceso de vulcanización dentro de la autoclave ha culminado, se procede a la despresurización de la autoclave y a la descarga de la misma. Actualmente la selección de tiempos, el encendido de la máquina y el control de alarmas necesarias después de que el proceso ha terminado, son controlados por un microcontrolador Atmega8l.

Terminado el tiempo de trabajo se procede a retirar ambos carros para ser luego ventilados y de esta forma terminar con el proceso de vulcanización.

Se puede apreciar que al iniciar el proceso el sistema debe de pasar por un lazo de control de presión, la cual esta constantemente siendo calibrada con la apertura y cierre de válvulas hasta alcanzar un error estable mínimo.



Procedimiento de vulcanización en Industrial Cóndor SAC

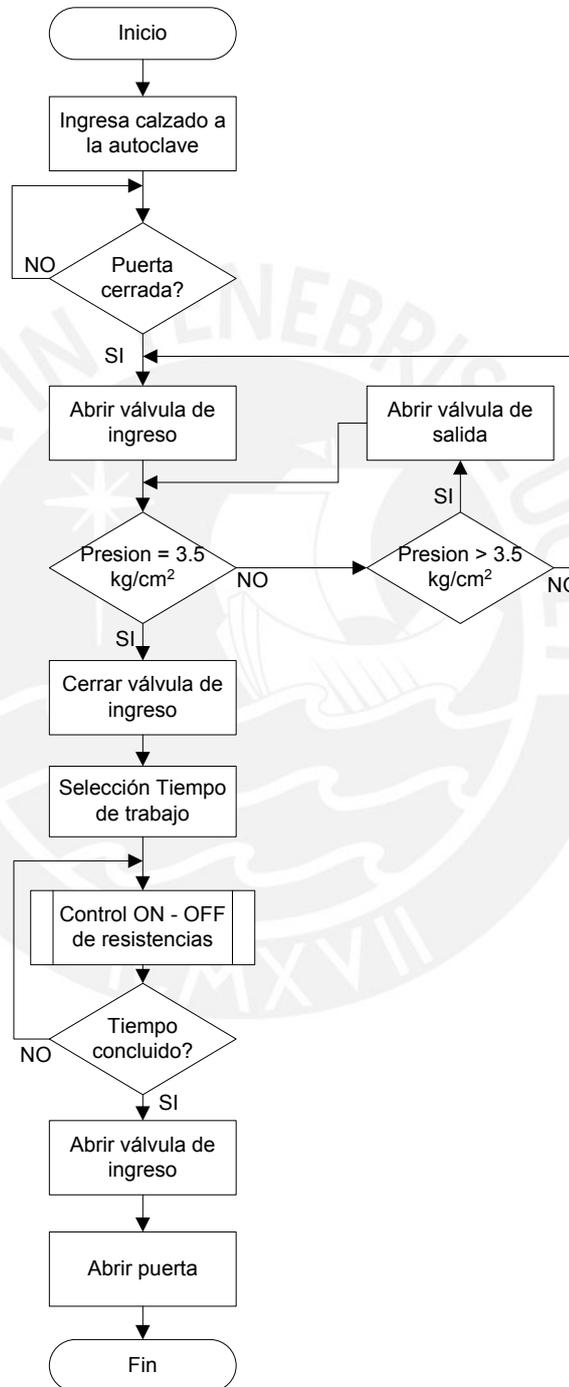


Gráfico N° 1 Elaboración Propia

1.5.3 Problemas encontrados del método actual

Debido a que la tecnología empleada en la autoclave para el control de presión no es adecuada en cuanto a precisión, el operario está constantemente visualizando y controlando el flujo de aire hacia la máquina por medio de válvulas manuales, de tal forma de que el indicador del manómetro no sobrepase el valor de presión buscada para el trabajo. En caso de que el indicador de presión sobrepase dicho valor, el operario o técnico encargado de maniobrar la autoclave tendrá que abrir alguna de las válvulas de escape de aire para que pueda bajar la presión dentro de la cámara y nuevamente empiece a buscar el valor requerido de presión esta vez con un rango de error menor. El proceso de calibración de la presión dentro de la autoclave se realiza de manera manual y con herramientas que no favorecen a una estabilización de presión en el nivel que se requiere teniendo un grado de error que puede perjudicar la mercadería que se está usando.

La temperatura interna de la máquina actualmente es controlada por dos pirómetros que realizan su algoritmo de control gracias a dos termocuplas instaladas en posiciones diferentes dentro de la autoclave, dicho control se basa en un prendido y apagado de resistencias a intensidades de corriente constante máxima y nula respectivamente.

Es de mi interés el desarrollo de un control automático para la autoclave, es por esto que se propone optimizar el trabajo de regulación de presión y encontrar un algoritmo de control adecuado que reemplace a los pirómetros en el área de control de temperatura y minimice el error en estado estable una vez alcanzada la temperatura impuesta por el operario.

CAPITULO 2

AUTOMATIZACION DE AUTOCLAVES A NIVEL INDUSTRIAL

2.1 Introducción

En este capítulo se van analizar los elementos principales de automatización que serán empleados a lo largo de todo este trabajo. La visión estará enfocada desde un punto de vista teórico y práctico. La visión práctica será necesaria puesto que la culminación de este trabajo se basará en los resultados de la investigación sobre automatización de autoclaves en plantas industriales. La visión teórica es importante en este capítulo ya que servirá para asentar los conceptos posteriores. Por lo tanto, el presente capítulo incluye una visión concerniente al Estado del Arte.

2.2 Automatización avanzada de autoclaves

Una autoclave es como una olla a presión por los materiales que lo componen. Estos materiales son literalmente cocinados y procesados dentro de la cámara, la cual puede generar temperaturas entre 50-200°C a través de calentadores eléctricos. Además controla un sistema de vacío y puede ser refrigerada ya sea por aire o por agua (*Plastics Technology* 1998).

Los sistemas de control para el proceso de vulcanización no tendrían razón de ser si no cumpliesen con el propósito de mejorar la calidad del curado del caucho. En este contexto, se han desarrollado máquinas que junto a procesos químicos aceleran la vulcanización del caucho y mantienen un estándar de calidad adecuado.

En el área de calzado, en especial en la etapa de vulcanización empleando el proceso de convección de calor gracias al uso de autoclaves, se han desarrollado diferentes sistemas de control que van desde el tubo de Bourbon para medir la presión y el uso de termocuplas para medir la temperatura, hasta microprocesadores que desarrollan un complejo sistema de control tipo SCADA.

Este sistema actualmente utilizado en el extranjero comprende varios módulos de control y programación de temperatura, presión y tiempo, así como monitoreo de datos a través de un computador.

El presente estudio muestra las tecnologías y métodos que actualmente se utilizan para el curado del caucho en la industria del calzado, además de los diferentes sensores y actuadores electrónicos que son partes esencial de una autoclave.

2.2.1 Sistemas de control en la actualidad

Para poder desarrollar un sistema de control dentro de una autoclave, se han generado diversas tecnologías además de métodos que aceleran el proceso de vulcanización de cargas en su interior. Entre las cuales tenemos avances en cuanto a medidores, controladores de presión y temperatura, así como también sistemas que integran ambos controles y añaden tecnologías de monitoreo remoto.

Cabe destacar que la gran mayoría de empresas en el extranjero están sujetas a limitaciones y referencias que da el código ASME en la Sección VIII, División I para el diseño e implementación de cámaras sometidas a presión, en nuestro caso autoclaves. Entre las principales limitaciones dentro de la división 1 tenemos:

- 1) La presión deberá ser menor a 3000 psi (204. 14 atm)
- 2) Recipientes para menos de 454.3 litros (120 galones) de capacidad de agua, que utilizan aire como elemento que origina presión.
- 3) Tanques que suministran agua caliente bajo las siguientes características:
 - Suministro de calor no mayor de 58,600 W (200,000 Btu/h)
 - Temperatura del agua de 99° c (210°f)

- Capacidad de 454.3 lt (120 galones)
- Recipientes sujetos a presión interna o externa menor de 1.0055 Kg./cm² (15psi)

Los actuales sistemas de control generalmente son desarrollados por las propias empresas que brindan el servicio de automatización de autoclaves, pero en todas ellas se busca dominar los mismos parámetros.

1) Temperatura y Presión

Uno de los parámetros a controlar más importante en el proceso de vulcanización es la temperatura, gracias al proceso de convección del calor producido por las resistencias calefactores y los acelerantes añadidos al caucho, se puede llegar a un perfecto curado del mismo. El rango óptimo de temperatura en la que trabaja una autoclave fluctúa entre los 100°C hasta 200°C aproximadamente. La cantidad de calor está asociado necesariamente a un tiempo de trabajo a la cual el producto debe de estar expuesto, para que pueda obtener las características de elasticidad y durabilidad.

El calor generado dentro de esta máquina es gracias a un juego de resistencias que son colocadas estratégicamente en el interior y alrededor de la máquina para poder brindar, gracias a un ventilador, un flujo uniforme de calor al calzado.

Los instrumentos de medición que actualmente se utilizan en la industria del calzado con los RTD o las Termocuplas. Estos sensores son usados en sistemas que emplean un control PID, en el cual es posible cambiar a gusto del usuario los diferentes parámetros de sintonización que involucra este tipo de control.

Muchos de los sistemas desarrollados en Europa incluyen un control de rampa con su propia histéresis y un número elevado de set point para poder precisar

mejor los niveles de temperatura como es el caso del Controlador C 360 de la empresa ABB [14].

El control convencional de hornos industriales confía en el control de la temperatura de atmósfera en un valor deseado, y asumen que la carga del horno tarde o temprano alcanza la temperatura de atmósfera. En un sistema ideal totalmente cerrado sin la pérdida de calor directa de la carga, esto tarde o temprano ocurrirá, pero lamentablemente esto no siempre sucede.

El Controlador Lógico Programable (PLC) también es utilizado en la industria de control de calor y presión dentro de una autoclave. En Ohio, Estados Unidos, la empresa McGill AirPressure Autoclave Control System [13] ha diseñado el sistema MAACS 2000, el cual utiliza un control PID para regular la temperatura, presión y vacío. Una de las características de estos controladores es que emplean un sistema de adquisición de datos además de una interfase gráfica con el usuario para el control y monitoreo completo del sistema de la autoclave.

A continuación se muestra una imagen del entorno gráfico que emplean para el control de los parámetros ya conocidos:

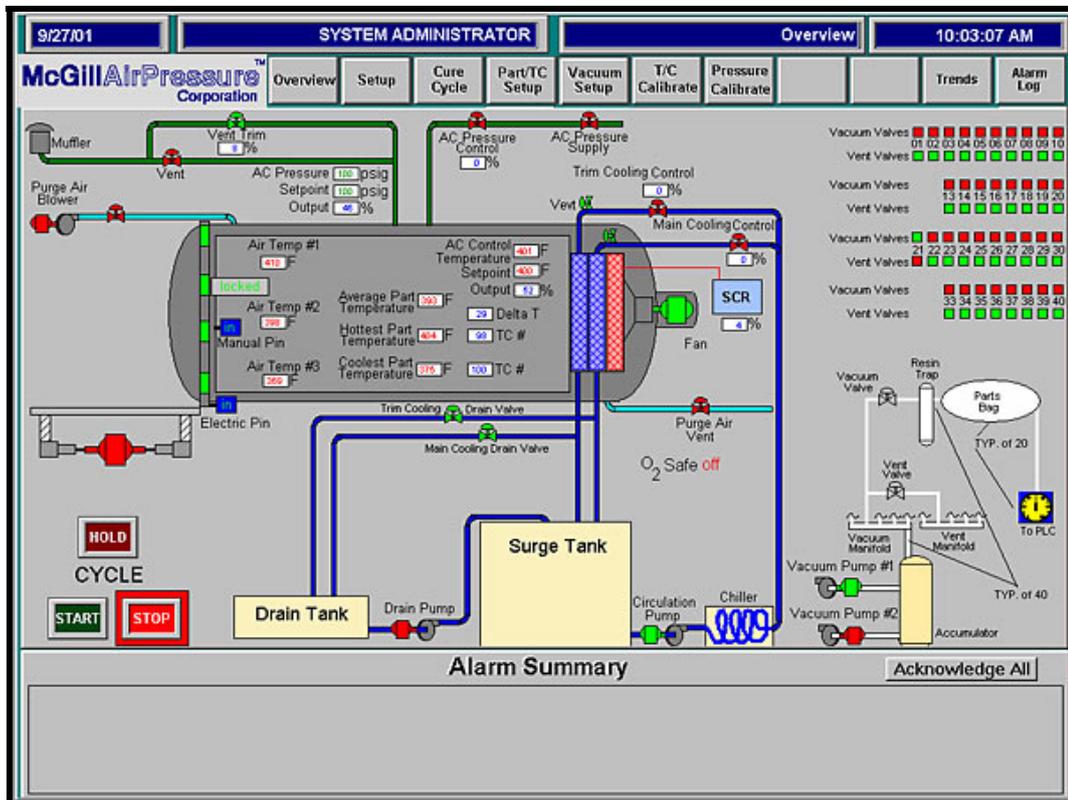


Fig. 2.1 Monitoreo de Autoclaves (McGill AirPressure Autoclave Control System)

Gracias a la tecnología aplicada en este tipo de control, el usuario va a poder controlar las siguientes etapas dentro de una autoclave:

- Rango de calentamiento
- Periodo de estabilización
- Rango de enfriamiento
- Presurización y despresurización
- Vacío

A comparación con el sistema anterior, el control que propone la empresa Prodigy (SCADA HMI Industrial Automation Software) [15] ,no está basado sólo para una autoclave sino que gracias a los software que realizan, han podido realizar un control SCADA de un número ilimitado de autoclaves que pueden ser monitoreadas desde una PC.

Este sistema también realiza un control PID con el cual han podido llegar a medir hasta 6 diferentes tipos de temperatura y presión para las diversas etapas en las que se encuentra el producto. El continuo monitoreo del proceso ha sido diseñado para poder proveer detalladamente las mediciones dentro de la autoclave y compararlas con alarmas de nivel ya fijadas por el usuario.

Snap Ultimate I/O controllers, es el nombre del nuevo diseño que desarrollo la empresa ASC para controlar una autoclave por medio de la Ethernet. Este ejecuta programas de control los cuales emiten ordenes para asegurar que se este llegando al calor apropiado de la autoclave según la temperatura requerida. El hardware Snap puede configurarse con protocolos comunes como FTP, SNMP y SMTP de tal forma que los datos puedan ser enviados a la empresa ASC para realizar reportajes del control de calidad del producto.

Un control muy parecido a este lo realiza la empresa Autoclave Engineers con controladores digitales CT 300 y la empresa Tescom Europe [17] con el controlador ER 3000 Series (Controlador Electrónico de Presión), pero el monitoreo con la PC lo hacen gracias a un protocolo de comunicación serial a través del RS-485.

La empresa Walton Process Technologies. WPT [16], creó un sistema diseñado para controlar diferentes tipos de máquinas, incluidas las autoclaves. Compuesto por un sistema de adquisición de datos con la aplicación de un PLC y sensores que serán monitoreados por el PCS Control Software, el cual se caracteriza por tener un control remoto para el uso de las interfaces; realiza reportes remotos al igual que el SNAP y puede ser conectada a un número

ilimitado de autoclaves al igual que el SCADA HMI Industrial Automation Software.

2) Carga de Autoclaves

En el mercado peruano la manera de cargar las autoclaves con el calzado se realiza empujando carros que contienen las ornas con el calzado que será vulcanizado. Por lo tanto para una automatización completa muchas empresas cargan y descargan la autoclave automáticamente y sin la necesidad de un operario gracias a un sistema de rieles con sensores que saben cuando el proceso de vulcanización ha culminado y cuando es necesario cargar o retirar el calzado.



Fig. 2.2 Carga automática de autoclaves (Anzani spa-Vulcomatic, Machines for footwear, leather goods, garments)

Un ejemplo claro de un sistema de automatización completa es la empresa italiana Anzani, la cual gracias a su sistema de automatización y control completo Vulcomatic (figura 2.2), minimiza la cantidad de operarios y aumenta la producción.

2.2.2 Metodologías para la implementación de sistemas de vulcanización

1) Vulcanización estática

Por compresión, por transferencia, por inyección y por vapor abierto (autoclave).

El método de vulcanización desarrollado por FGH Controls Limited [12] utiliza dos sensores para el monitoreo de temperatura en las autoclaves, uno de ellos mide la temperatura de la carga y el otro controla la temperatura del aire dentro de la máquina. La temperatura de la carga es comparada con el set point deseado y un set point del aire es calculado con la finalidad de obtener una apropiada diferencia del “Termal Head” entre la temperatura de la carga y el aire bajo el siguiente algoritmo:

$$SPA = SPL + R (SPL - TL)$$

- SPA es el set point de la atmósfera,
- SPL el set point de la carga,
- R es el termal head ratio
- TL es la temperatura medida.

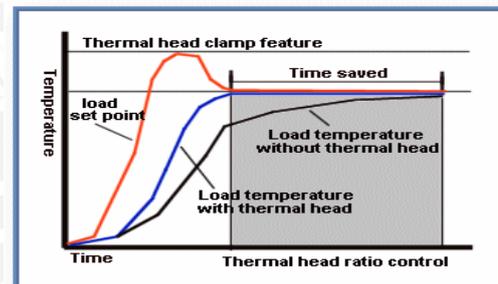


Fig. 2.3 Termal Head (FGH Controls Limited)

Según este método podemos ver como se puede ahorrar tiempo de trabajo y energía obteniendo una respuesta mucho más rápida que la convencional. Otro método que ayuda a una elevación más rápida de la temperatura es el uso de microondas para calentar el caucho.

Otros métodos para la vulcanización de cauchos se mencionan a continuación:

2) Vulcanización continua

Puede ser por vapor abierto (tubo), por aire (caliente), baños de sal (LCM).

3) Vulcanización por Microondas

Actualmente se utilizan diferentes procedimientos de vulcanización dependiendo del tipo de producto final. No obstante la mayoría de ellos funcionan en un proceso intermitente o discontinuo que limita mucho el régimen de producción del material curado. El principal obstáculo que impide el vulcanizado en un proceso continuo es la baja conducción térmica del caucho.

En el Grupo de Ingeniería de Microondas de España se estudia el calentamiento de los materiales de caucho mediante microondas, que provocan un incremento rápido (del orden de pocos segundos) en la temperatura a través de la masa de los moldes. Una vez se alcanza la temperatura adecuada, ésta debe ser mantenida durante el tiempo necesario para que se produzca la vulcanización. Este estudio se complementa con técnicas híbridas microondas-aire caliente para el mantenimiento de la temperatura de vulcanizado de una forma más eficiente. [9]

La diferencia entre los métodos estáticos y continuos es que, en el primero, la pieza de goma permanece estática (sin movimiento) junto a una fuerza de calor, mientras que en el segundo el artefacto de caucho se mueve dentro de una fuerza de energía.

2.3 Síntesis sobre el asunto de estudio

El caucho crudo como materia prima no presenta características mecánicas muy apropiadas para su uso directo en la industria del calzado y precisa de un proceso de curado específico llamado vulcanización (José Manuel Catalá 1999). Todas las tecnologías mostradas basan su funcionamiento en la medición de las variables térmicas de la autoclave según los requerimientos del usuario. De esta forma se puede controlar el estado del caucho en sus diferentes etapas dentro de la vulcanización.

Las nuevas herramientas de Software permiten manejar mejor los resultados; debido a su flexibilidad y costo estos van en aumento. El uso de sistemas de

control SCADA mejoran el proceso de producción gracias al monitoreo y control de temperaturas, presiones y alarmas de precaución en caso se esté fuera de los rangos requeridos.

El método Thermal Heat Ratio (FGH) optimiza el proceso de vulcanización, ayuda en el ahorro de energía y permite que la cantidad de producción incremente gracias a la reducción en el tiempo de trabajo de la máquina.

Las tecnologías basadas en la radiación de microondas son costosas, porque es necesario un alto consumo de energía eléctrica para acelerar el incremento de temperatura. Sin embargo, tiene una considerable serie de ventajas como una mayor calidad de los productos, que repercute en la competitividad de la empresa; una mayor rapidez en el procedimiento y hornos más reducidos, que influye en la dimensión de las instalaciones; una mayor eficiencia energética; un entorno de trabajo frío, por lo que no hay que refrigerarlo, y un menor riesgo medioambiental, porque no hay posibilidad de fugas. En definitiva, el calentamiento por microondas, aunque más caro, permitirá reducir los costes de producción. (*Gustavo Bueso*)

La aplicación de alguna de estas tecnologías dependerá de cuantos equipos similares a los mencionados se estén utilizando actualmente en la autoclave que se busca controlar. De esta manera se buscará minimizar los costos en cuanto a compra de sensores y actuadores. Se busca realizar un control adecuado de la presión a la que debe someterse la autoclave cuando se encuentra en funcionamiento, no tomando en cuenta la despresurización de la máquina.

2.4 Componentes tecnológicos empleados en el control de autoclaves

Antes de poder explicar el nuevo diseño que se empleará, es necesario explicar los diferentes sensores y algoritmos de control necesarios para poder llevar a cabo una automatización completa de la autoclave. Posteriormente en

el capítulo 4 se explica la selección del sensor que mejor se adecue a nuestro sistema.

2.4.1 Sensores

A continuación encontraremos los diferentes sensores de temperatura y de presión encontrados tanto en el mercado nacional como internacional.

2.4.1.1 Sensores de Temperatura

Los sensores son los elementos primarios de medición de variables del proceso, siendo algunos usados para lectura e indicación y otros para transformar la variable medida en una señal eléctrica, los sensores de temperatura más usados en la industria son:

a) Sensores de Temperatura Resistivos (RTD)

El cambio en la resistencia de un metal hace posible medir la temperatura a través del paso de corriente eléctrica. La aplicación de este sensor, se realiza en cualquier actividad industrial y los rangos de temperaturas; según el material utilizado son:

- Platino : -200 a 650 °C
- Cobre : -100 a 260 °C
- Níquel : -100 a 205 °C
- Película de platino: -50 a 550 °C

- Las principales ventajas de este sensor son:
 - Comportamiento lineal en amplio rango de operación.
 - Amplio rango de temperatura, aplicación para altas temperaturas.
 - Mejor estabilidad a altas temperatura.
 - Alta relación señal a ruido: mejora la exactitud y permite distancias mayores entre el sensor y el equipo de medición.

- Las desventajas que se encuentran son:

- Requiere una alimentación externa, la magnitud de la fuente de corriente debe ser menor a 5mA para no causar un aumento de temperatura (1°C) en el RTD.
- Baja sensibilidad.
- Alto costo.

b) Termistor

Son hechos de óxidos metálicos, estos son bastantes sensibles en rangos pequeños de temperatura. La gran mayoría son de coeficiente de temperatura negativo (NTC) es decir la resistencia disminuye cuando la temperatura aumenta.

Las ventajas de los termistores son:

- Alta sensibilidad (rangos pequeños)
- Rápidos

Las desventajas que presentan son:

- No lineales
- Frágiles
- Requieren alimentación Externa
- Rango de Operación limitada.

c) Termocupla

Las termocuplas, también llamados comúnmente Termopares, se utilizan extensamente, ofreciendo un amplio rango de temperaturas y una construcción robusta. Además, no precisan alimentación de ningún tipo y su reducido precio los convierte en una opción muy atractiva para grandes sistemas de adquisición de datos. El sensor es un circuito formado por dos cables distintos, unidos en ambos extremos, desarrollando un voltaje proporcional a la diferencia de temperaturas en las dos uniones a las cuales se les conoce como juntura de medición y juntura de referencia[20].

2.4.1.2 Sensores de Presión

Usualmente estos instrumentos registran una diferencia de presiones tomando como referencia a la presión atmosférica, denominada, “presión manométrica”

a) Transductor Resistivo

Consiste en un elemento elástico que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado apoyado sobre el potenciómetro de precisión el cual está conectado a un circuito de puente de Wheastone. La medición varía de 0-300 Kg./ cm²

b) Transductores Magnéticos

Inductancia variable: Consiste en el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina al aumentar la inductancia en forma casi proporcional al núcleo contenido dentro de la bobina.

Ventajas: No producen rozamientos en la medición, respuesta lineal, no precisan ajustes críticos en el montaje.

Reluctancia Variable:

Consiste en un imán permanente o un electroimán el cual crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. Presentan una alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo y son sensibles a la temperatura. Precisión en el orden de los $\pm 5\%$.

c) Transductores Capacitivos

Se caracterizan por su pequeño tamaño y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil necesitando de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición.

d) Transductores Piezoeléctricos

Son materiales cristalinos deformándose físicamente por la acción de una presión, generando una señal eléctrica, los materiales típicos en los

transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanio de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150°C en servicio continuo y de 230°C en servicio intermitente [20].

2.4.2 Controles empleados

Los algoritmos de control más destacados que se encuentran en el mercado son los que emplean un control difuso y el control proporcional integral derivativo.

a) Control Difuso

Esta teoría nos permite manejar y procesar información de una manera similar a como lo hace el cerebro humano. Con los conjuntos nebulosos podemos definir sub-conjuntos, de una manera tal que cualquier elemento pueda pertenecer a ellos en diferentes grados. Con reglas difusas es posible procesar las relaciones entre las variables fuzzy y producir una salida nebulosa. Y lo mejor de todo, a partir de esas salidas nebulosas podemos proporcionar cantidades binarias y cantidades continuas, como el estado de un interruptor o una cantidad de dinero. Wgonz

b) Control PID

En el control proporcional-integral-derivativo, la acción correctora es determinada por tres factores:

- 1) La magnitud del error. Esta es la parte proporcional.
- 2) La integral con respecto al tiempo de la señal de error, en otras palabras la magnitud del error multiplicada por el tiempo que ha permanecido. Esta es la parte integral.
- 3) La razón de tiempo de cambio del error, un rápido cambio en el error produce una acción correctora mayor que un cambio lento en el error. Esta es la parte derivativa [23].

2.4.3 Controladores Lógicos Programables

Un autómata es una máquina industrial susceptible de ser programada (autómata programable industrial API), basada en un sistema que incluye un microprocesador dotado de un hardware estándar independiente del proceso a controlar. Se adapta a tal proceso mediante un programa de usuario específico (software), escrito en algún lenguaje de programación y que contiene la secuencia de operaciones a realizar.

La configuración del autómata, llamada arquitectura interna, como en todo sistema basado en un microprocesador, incluye fundamentalmente los siguientes cuatro bloques básicos: una CPU o unidad central de proceso, una memoria interna de trabajo (RAM), una memoria de programa (RAM, EPROM, EEPROM), y las interfaces de entradas y salidas conectadas al bus interno. A su vez, tanto la CPU como la memoria de programa están conectadas a dicho bus interno [34].

2.5 Modelo Teórico

En nuestro país la mayoría de autoclaves son diseñadas por las mismas empresas y son adecuadas a sus requerimientos, pero generalmente no utilizan ningún tipo de control para optimizar su trabajo, es por ello que se busca desarrollar un sistema de control eficiente y de precio accesible para el empresario. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas tecnologías para el control de una autoclave, debe de basarse en estos dos importantes factores.

El monitoreo de las variables en el interior de una autoclave, como son la presión y la temperatura, depende fundamentalmente de:

- Lecturas en tiempo real que se obtengan gracias a la instalación de sensores adecuados para dicho sistema.
- Procesamiento eficiente de las señales provenientes de los sensores.
- Control de actuación de las válvulas y resistencias calefactoras.

En muchos casos los valores de temperatura, presión y tiempo son variados según el tipo de calzado que ingresa a la autoclave, ya sea por el espesor del caucho empleado o por el material textil o plástico del cual está formada la zapatilla. Por tal motivo se busca realizar un control que se adecue a los diferentes cambios de configuraciones que se tengan para la autoclave.

Al controlar la temperatura se espera que una vez llegada al punto fijo (SP) esta no oscile con una amplitud grande, como ocurriría en un control ON/OFF, sino que se estabilice de manera gradual, como lo realizaría un control PID.

Manejando el flujo de presión a través de una válvula solenoide, se busca reemplazar la función que realiza el operario cuando abre o cierra la válvula de ingreso de gas. Este flujo de presión será regulado gracias al sensor de presión que servirá como el lazo de realimentación en el diseño de control para la máquina.

El costo es un factor económico que depende fundamentalmente de la inversión que tenga para adquisición de equipos y de la tasa de retorno esperada por la empresa proveedora del servicio.

El diseño de un sistema que cumpla con estos requerimientos, no es imposible de realizar. Además en un futuro se puede añadir un entorno visual para el usuario; de tal manera que pueda monitorear la vulcanización de su calzado desde su computadora.

Al tener un control adecuado de estas variables, el sistema desarrollado no solo se concentraría en un control para vulcanización del caucho en el calzado, si no para otros trabajo que utilicen esta materia prima, un ejemplo de este trabajo son las plantas que emplean el proceso de vulcanización para la cura de llantas.

CAPITULO 3

APLICACIÓN DEL CONTROL DE AUTOCLAVES PARA EL PROCESO DE VULCANIZACION

3.1 Introducción

En el presente capítulo presenta el lugar donde se desarrollará este trabajo, para luego de un análisis del mismo se obtendrán las hipótesis planteadas para desarrollar la automatización de la autoclave, así como los objetivos a cumplir una vez implementada esta tesis. Una vez claro estos puntos se procederá a realizar un esquema tentativo de la metodología que se empleará para poder ejecutar este proyecto.

3.2 Hipótesis de la investigación

3.2.1 Hipótesis principal

Dado que los sistemas diseñados para el control de presión, temperatura y tiempo, empleando algoritmos de control tipo PID o Difuso en el mercado internacional emplean herramientas de primera calidad en cuanto al control utilizado así como a la infraestructura de las autoclaves se refiere, y debido a la poca tecnología que se utiliza en las pequeñas y medianas empresas que incursionan en el mercado nacional en el área del calzado; es necesario la implementación de un sistema fiable que controle la presión de aire que ingresa a la autoclave (monitoreo de la presión dentro de la autoclave durante el tiempo de trabajo), además de un control de temperatura dentro de la autoclave. Por lo tanto será necesario el reemplazo de las válvulas manuales y el sensor de presión (indicador) por electroválvulas lineales o válvulas solenoides, y transmisores de presión respectivamente, así como la eliminación del controlador de encendido y apagado de las resistencias calefactoras, empleado actualmente en dicha autoclave, por un control PID que maneje las resistencias calefactoras con ayuda de relés de estado sólido comandados con señales que emplean Modulación de Ancho de Pulso, conocida como PWM por sus siglas en inglés.

3.2.2 Hipótesis Secundarias

- 1) El uso de las tecnologías actuales utilizadas en el proceso de control de presión, empleado en la fábrica, en la etapa de vulcanización de suelas constituyen un factor que no favorece a un curado óptimo del calzado.
- 2) Un controlador PID para la temperatura y la presión es adecuado debido a que la variación de estas variables en dicho ambiente se realiza de forma lenta de modo accesible para el monitoreo y control de las mismas.
- 3) Un diseño de fácil interacción con el usuario hará que cualquier operario pueda maniobrar la autoclave de manera rápida y fácil, pero siempre bajo la supervisión de un técnico. Se empleará una interfase hombre-máquina para el control de variables en la autoclave.
- 4) El sistema de automatización que se implementará en la autoclave implicará que el control de tiempos diseñado anteriormente sea variado para obtener un curado óptimo del calzado.

3.3 Objetivos de la investigación

3.3.1 Objetivo General

Diseño e implementación de un equipo que controle la presión, la temperatura y el tiempo, permitiendo una interacción automática de los actuadores para lograr obtener niveles de consignas adecuados dentro de la autoclave, teniendo en cuenta un diseño simple y amigable para que cualquier operario de la empresa pueda manipularlo.

3.3.2 Objetivos específicos

Reemplazar el control de prendido y apagado de las resistencias calefactoras al alcanzar la consigna de temperatura, por un controlador que minimice el error en estado estable del sistema cuando se alcanzan los 136° C y disminuya el tiempo de establecimiento de la variable monitoreada.

Eliminar las válvulas manuales que se utilizan para el ingreso de aire, por actuadores que se controlen de forma automática comandadas por medio de un controlador lógico programable, de tal forma que la presión que se desea alcanzar dentro de la cámara tenga el menor error para evitar la apertura de las válvulas de escape de aire.

Elaborar un tablero donde el controlador debe de tener un revestimiento apantallado que evite susceptibilidad al ruido, además de estar herméticamente cerrado para que el polvo de los químicos utilizados en la fábrica no ingrese al tablero.

3.4 Universo y Muestra

El universo esta conformado por todas aquellas empresas que utilizan al caucho como materia prima para sus productos y realizan el proceso de vulcanización dentro de autoclaves. La muestra a utilizar dentro de este universo es la fábrica de calzado Industrial Cóndor SAC. donde se llevará a cabo las pruebas concernientes del nuevo sistema diseñado para su autoclave.

3.5 Metodología de la investigación

Etapa 1: Investigación Preliminar

- Investigación minuciosa de los pasos que se realizan para la utilización del aire que ingresa a la autoclave.
- Investigación de la cantidad de temperatura y presión que debe soportar el calzado estando dentro de la autoclave.
- Investigación de los resultados de las técnicas utilizadas actualmente para la vulcanización.
- Definición de objetivos y límites

Etapa 2: Estudio del equipo para el control de la autoclave

- Análisis de los datos tomados de la autoclave.

- Realización del diagrama de instrumentación.
- Selección de sensores para las variables controladas (Presión y Temperatura).
- Selección de los actuadores.
- Estudio de amplificadores de señales, diseño de filtros, convertidores análogo digitales, en caso fueran necesarios. Elección de controladores lógicos que se adecuen a los requerimientos.

Etapa 3: Diseño del Sistema de automatización

- Desarrollo de la lógica de control para cumplir con los requerimientos de trabajo.
- Desarrollo del programa necesario para la comunicación del controlador con la interfase del usuario.
- Pruebas preliminares.

Etapa 4: Diseño e implementación del tablero

- Diseño mecánico del tablero de control.
- Distribución de componentes.
- Integración de los programas desarrollados.
- Primeras pruebas sin carga.
- Ajustes y afinamientos.

Etapa 5: Pruebas y ajustes

- Pruebas del nuevo sistema con carga.
- Análisis de los resultados obtenidos.
- Perfeccionamiento del sistema en base a errores encontrados.

CAPITULO 4

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA PARA EL CONTROL DE LA AUTOCLAVE

4.1 Introducción

Luego tener conocimiento de las tres variables a controlar en este trabajo y tomando como referencia la investigación previa de los diferentes tipos de control en autoclaves, todas ellas automatizadas mediante controladores programables y monitoreadas gracias a una interface gráfica, se describe el procedimiento y la tecnología empleada para lograr la automatización del proceso de vulcanización desarrollado en la autoclave. En este trabajo no se hace referencia al tratamiento a priori que se le da al caucho, si no al proceso que se efectúa dentro de la máquina una vez agregado a las suelas los distintos químicos mencionados en el capítulo 1.

Por lo tanto, el presente capítulo explica el diseño y la implementación de este proyecto teniendo como pilar los tres primeros niveles de la pirámide de automatización (ver Fig. 4.1).

4.2 Diseño del sistema

El proceso que llevan acabo los operarios para controlar la autoclave se ha descrito anteriormente (véase punto 1.4.2 Introducción al procedimiento empleado). En esta etapa se explicará el diseño del nuevo sistema de automatización requerido por la empresa Industrial Cóndor SAC para la autoclave, el cual busca reemplazar tanto el control de tiempos y temperatura así como crear un control para la temperatura mediante el uso de tecnologías y metodologías de primera calidad.

4.2.1 Diseño de automatización e instrumentación

El diseño de este sistema se ha basado en la pirámide de automatización o también llamada pirámide CIM (ver Fig 4.1), en cuya base se sitúan los dispositivos de control más elementales como sensores y actuadores hasta el

vértice superior en el cual encontramos el nivel de automatización de la administración global.

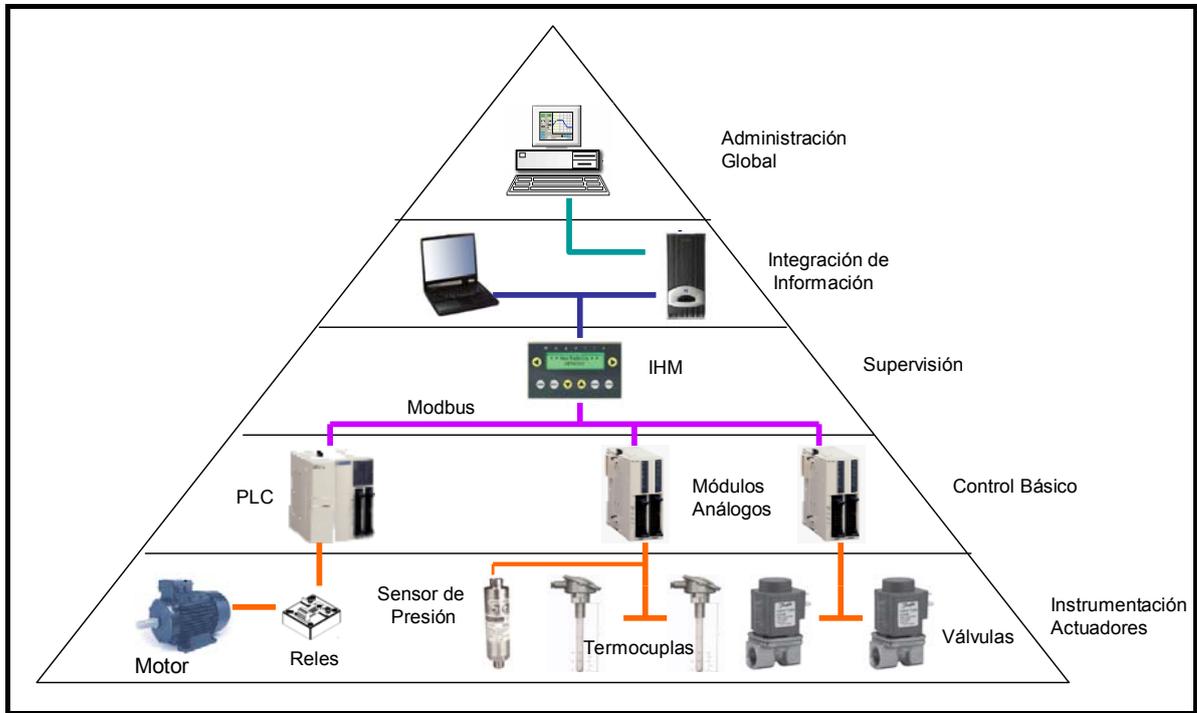


Fig. 4.1 Pirámide de la automatización

El desarrollo de esta tesis busca cubrir los primeros tres niveles de esta pirámide:

- **Instrumentación y Actuadores:** En esta etapa se cubre el funcionamiento de los dos transmisores necesarios para la automatización de la autoclave, las cuales son las Termocuplas tipo J y el transmisor de Presión. Además se explica el uso de los distintos actuadores entre los cuales se destacan los relés para el control de las resistencias calefactoras y las válvulas para el control del aire.
- **Control Básico:** Describe el modo de funcionamiento del PLC que se emplea para el sistema.
- **Supervisión:** La supervisión de este proyecto se realiza a través de la interfase hombre-máquina. En esta etapa se describe el software usado para la configuración del HMI y las diferentes pantallas que se presentan

para la supervisión del trabajo. Además se describe el protocolo MODBUS necesario para la comunicación con la etapa de control básico.

Las etapas siguientes, de Integración de Información y Administración Global, no serán consideradas en este trabajo.



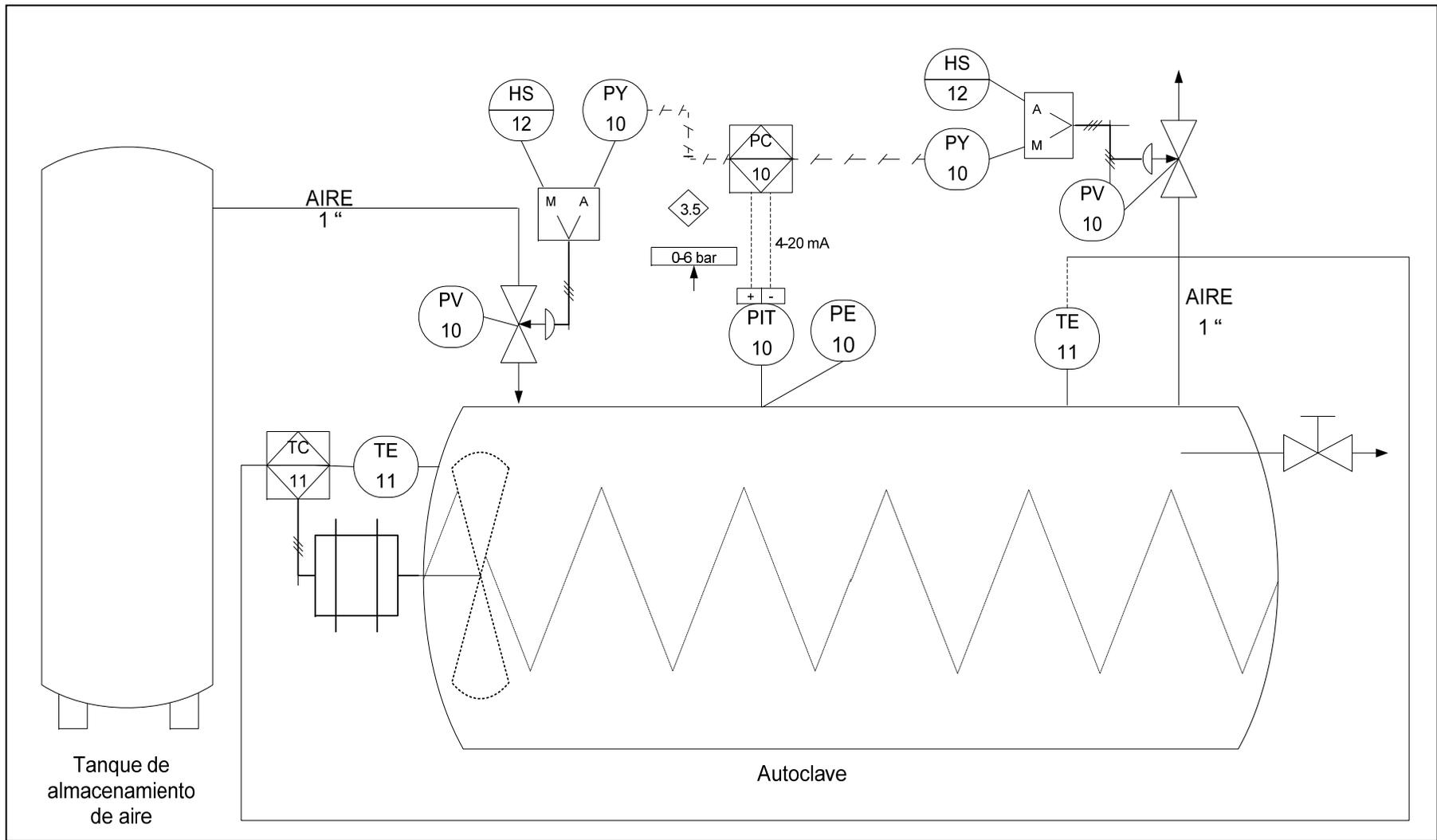


Fig. 4.2 Diagrama de Instrumentación

4.2.2 Instrumentación y Actuadores

Esta etapa se describe los requerimientos necesarios para medir y controlar la temperatura y la presión dentro de la autoclave.

4.2.2.1 Medición de Temperatura

El control de temperatura es la parte más crítica de este proyecto. Para que el diseño cumpla con los requerimientos de la autoclave, se ha seleccionado dos Termocuplas tipo J (Termocuplas hierro - constantán) debido a que resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes y en vacío hasta 760° C. La ventaja fundamental de las Termocuplas Tipo J es su bajo costo.

Las siguientes limitaciones se aplican al uso de las Termocuplas Tipo J:

- No se deben usar en atmósferas sulfurosas por encima de 540° C.
- A causa de la oxidación y fragilidad potencial, no se las recomienda para temperaturas inferiores a 0° C.
- No deben someterse a ciclos por encima de 760° C, aún durante cortos períodos de tiempo, si en algún momento posterior llegaran a necesitarse lecturas exactas por debajo de esa temperatura.

Para efectos de este trabajo se debe de considerar un rango de trabajo de las termocuplas que va desde los 24°C (temperatura interna antes al empezar la jornada de trabajo), hasta los 150°C (temperatura interna remanente luego de descargar el calzado). Ambas termocuplas serán conectadas al PLC a través de un modulo de extensión especial que trabaja con Termocuplas tipo K, J y T, RTD y PT100 (véase Figura 4.3). La ubicación y la conexión de las termocuplas se podrán observar en el plano P&ID (Véase anexo 5: Diagrama de Instrumentación).

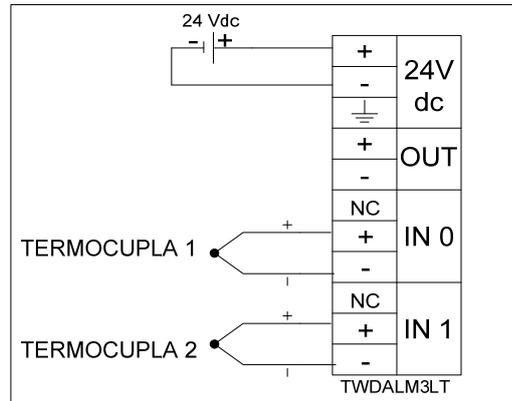


Figura 4.3 Conexión de las Termocuplas (Elaboración propia)

Este módulo se ha configurado para poder trabajar en grados Celsius; en la tabla 4.1 se muestran las características de la señal digital generada a través del convertor Análogo/Digital.

| Características de entrada analógica | Módulo TWDALM3LT (Termocupla tipo J) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Rango de entrada | 0 a 1200° C |
| Periodo de muestreo | 50 ms |
| Tipo de Entrada | Entrada Diferencial |
| Modo de conversión | $\Sigma\Delta$ tipo A/D |
| Resolución digital | 4096 incrementos (12 bits) |
| Monotonicidad | Sí |
| Valor de entrada del LSB | 0.1° C |

Tabla 4.1 Configuración del Módulo Analógico TWDALM3LT (Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware)

Los valores de temperatura son enviados al HMI para que el operador pueda verificar si los valores medidos son correctos. Para la calibración preliminar de este sistema se utilizan los pirómetros que se encuentran instalados en la autoclave, por ello es necesario crear un nuevo tablero de control que trabaje al principio en paralelo al control actualmente instalado en la autoclave hasta que se logre una perfecta calibración de las señales y una perfecta sintonización del funcionamiento del sistema, posteriormente este tablero reemplazará por completo al tablero antiguo.

4.2.2.2 Medición de Presión

Uno de los inconvenientes que se ha encontrado en el desarrollo de este trabajo, son las altas temperaturas que debe soportar el sensor de presión. Debido a que la mayoría de transmisores de presión presentan precios muy elevados cuando se trabaja a temperaturas mayores a los 85° C se busca agregarle a la base del transductor un dispositivo que reduzca la temperatura del aire antes de que ésta llegue al sensor. Por requerimiento de la empresa la presión será controlada de forma escalonada y se necesitará un transmisor de presión que tenga un rango de trabajo de 0 a 6 bar.

Los factores que influyen considerablemente en la temperatura de trabajo del transmisor (Fig. 4.4) son los siguientes:

- | | |
|---|---|
| (A) Temperatura de operación del Transductor | (E) Conducción del calor en el tubo o sifón |
| (B) Convección de calor radiante | (F) Temperatura del fluido |
| (C) Convección del calor al ambiente | (G) Velocidad |
| (D) Intercambio de calor durante el flujo de aire | (H) Aislamiento |
| | (T) Temperatura del ambiente |

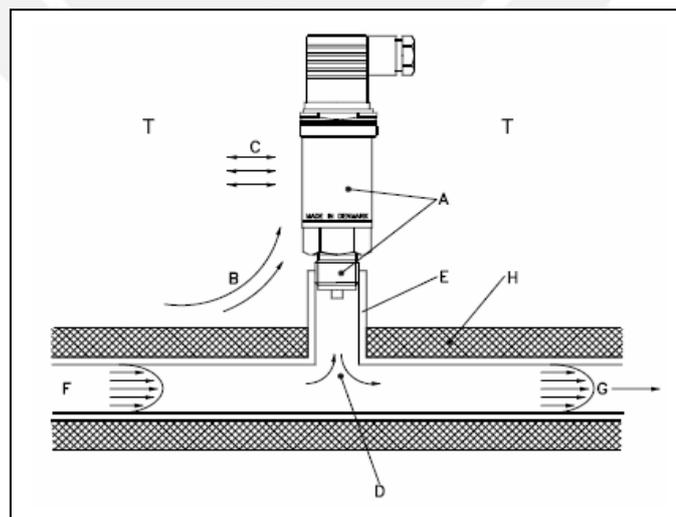


Fig. 4.4 Reducción de temperatura para transmisores de presión (Medium and Ambient Temperature Influence on Pressure Transmitter on MBS 33)

Tanto el intercambio de calor durante el flujo de aire y la conducción de calor en el tubo o sifón, dependen del tipo de fluido que se utiliza, de la velocidad, la temperatura del ambiente y de las dimensiones del tubo o sifón. Por lo general se recomienda que el transductor sea montado sobre un tubo o sifón de 2 cm de longitud para fluidos cuya temperatura bordea los 120° C, de esta forma la temperatura cae hasta los 85° C, en el caso que la temperatura del fluido sea mayor, la longitud del sifón deberá incrementarse. Para el caso del transductor seleccionado, se le añadirá un sifón de dos vueltas cuya longitud es aproximadamente 15cm, mayor a los 3cm recomendados, así garantizamos que la temperatura del fluido sea menor a los 85 ° C.

El transmisor seleccionado para medir la presión dentro de la autoclave es el MBS 300 de la marca Danfoss y sus características se muestran en la siguiente Tabla 4.2:

| | |
|------------------------|------------------|
| Rango de Presión | 0 – 6 bar |
| Medio | Aire, Gas y Agua |
| Temperatura del Fluido | -45 a 85 ° C |
| Señal de Salida | 4- 20 mA. |
| Precisión | +/- 0.5% FS |
| Protección | IP 65 |
| Conexión | G 1/4 |
| Alimentación | 9 - 32Vdc |

Tabla 4.2 Características del Transmisor MBS 300
(MBS 3000 Pressure Transmitter)

El transmisor se conectó al PLC a través de un módulo de extensión especial que trabaja con entradas analógicas en los rangos de 4-20mA y de 0-10V (véase Fig 4.4 Conexión del Transmisor MBS 300). Este módulo se ha configurado para trabajar con señales de 4-20mA; las características de la señal digital generada a través del conversor Análogo/Digital son las mostradas en la Tabla 4.3.

| Características de entrada analógica | Módulo TWDAMM3HT (Termocupla tipo J) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Rango de entrada | 4-20mA |
| Periodo de muestreo | 50 ms |
| Tipo de Entrada | Entrada Diferencial |
| Resolución digital | 4096 incrementos (12 bits) |
| Monotonicidad | Sí |

Tabla 4.3 Configuración del Módulo Analógico TWDAMM3HT (Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware)

Los valores de temperatura son enviados al HMI para que el usuario pueda verificar si los valores medidos son correctos. Para corroborar los valores procesados por el PLC y enviados al HMI, se podrá visualizar el manómetro situado al lado del transmisor. La ubicación y la conexión del transmisor se muestra en el plano P&ID (Véase anexo 5: Diagrama de Instrumentación).

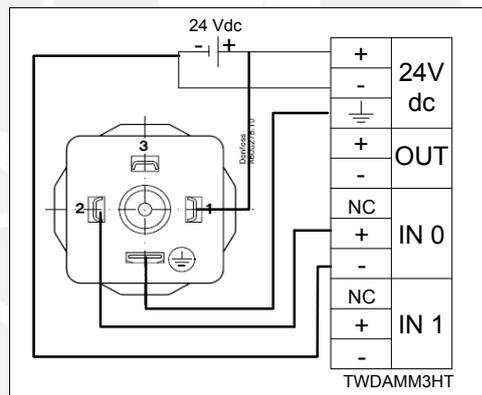


Fig. 4.5 Conexión del Transmisor MBS 300 (Elaboración propia)

4.2.2.3 Válvulas Solenoides

Se requieren dos válvulas solenoides, para controlar el ingreso (Modelo EV220B 18B) y salida (Modelo EV220B 22B) de aire para el inicio y fin del ciclo de trabajo respectivamente. La ubicación y la conexión de ambas válvulas se muestra en el plano P&ID (Véase anexo 5: Diagrama de Instrumentación).

Los requerimientos del actuador se muestran a continuación:

- a) Realizar trabajos con aire, como fluido principal.
- b) La presión de trabajo debe ser mayor a 4 kg/cm²

- c) El diámetro de la válvula de salida debe de ser de 1"
- d) El diámetro de la válvula de entrada debe de ser menor a 1" para que el ingreso de aire sea lento y se pueda realizar un mejor control de presión.

Se escogieron dos válvulas de la marca Danfoss; sus características se muestran en la Tabla 4.4

| Modelo | EV220B 18B | EV220B 22B |
|-------------------------|--|--|
| Características | <ul style="list-style-type: none"> • Para aplicaciones industriales severas • Indicado para aceite y aire. También se puede utilizar para agua y soluciones acuosas neutras siempre y cuando la temperatura del agua no exceda 60 °C | <ul style="list-style-type: none"> • Para aplicaciones industriales severas • Indicado para aceite y aire. También se puede utilizar para agua y soluciones acuosas neutras siempre y cuando la temperatura del agua no exceda 60 °C |
| Tiempo de apertura | 200ms | 200ms |
| Tiempo de cierre | 500ms | 500ms |
| Rango de presión | 0,1 - 10 bar | 0,1 - 10 bar |
| Tensión de alimentación | 220 V | 220 V |
| Conexión | 3/4" NPT | 1" NPT |

Tabla 4.4 Válvulas Solenoides

4.2.2.4 Relés de Estado Sólido (SSR-Solid State Relay)

Los relés de estado sólido se emplearán para el control de la intensidad de corriente que fluirá hacia las resistencias calefactoras. Al tener una intensidad de corriente de 20 amperios fluyendo a través de ellas, es necesario añadirle a sus bases un disipador de calor para que estas puedan trabajar adecuadamente.

Las resistencias calefactoras actualmente son controladas por contactores, a través de los cuales se conectan o desconectan las resistencias una vez alcanzada la temperatura deseada. En el sistema automatizado que emplea un control PID, el uso de contactores no se adecua a este trabajo ya que se

trabajara con señales moduladas las cuales malograrían los contactores, es por esto que se ha decidido emplear relés de estado sólido.

Se dispone de una instalación trifásica de tensión igual a 220 Vac, con una distribución de 12 resistencias internas en configuración delta, de modo que se requiere 6 relés; 3 de ellas por cada grupo de seis resistencias (Véase anexos 2.3 y 2.4 Control de Resistencias Calefactores Grupos 1 y 2 respectivamente), los cuales deberán trabajar según las especificaciones técnicas de las resistencias, es decir, para su selección será importante saber la corriente de consumo cuando están completamente activadas. Cada relé es situado en cada una de las fases de la conexión delta, de esta manera el costo de cada componente se reduce ya que la corriente que deben soportar será solo $1/1.73$ de la corriente que soportarían si se situaran en cada una de las tres líneas. En la etapa de Diseño Eléctrico se explicará detalladamente la selección y distribución de los relés de estado sólido.

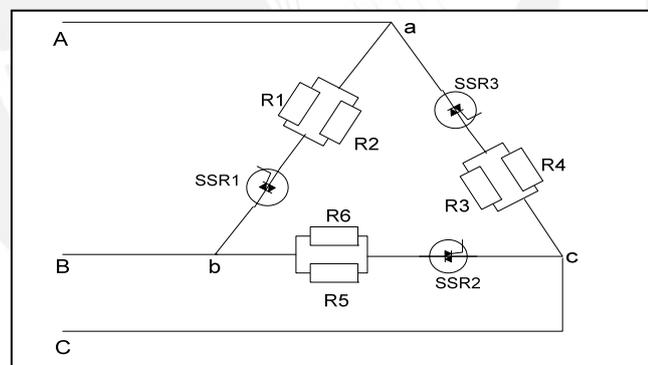


Fig. 4.6 Conexión Delta de Relés de Estado Sólido

4.2.3 Control Básico

El segundo nivel de la pirámide de automatización, ver Fig.4.1. Para lograr el control de la presión, tiempos y temperatura se selecciono un PLC de la marca TELEMECANIQUE, modelo TWIDO MODULAR, debido a su fácil programación y a su entorno amigable con el usuario. Utilizará el algoritmo de control PID de temperatura mediante el PLC, la presión bajo un control secuencial y el tiempo por medio de una subrutina en lenguaje grafico de programación (Grafcet) propio del PLC.

4.2.3.1 Definición del número de entradas

Antes de poder elegir el controlador es necesario saber el número de entradas y salidas que se requieren para realizar la automatización de la autoclave.

| Descripción de E/S | Tipo de canal |
|--|-------------------|
| Switch para puerta | Entrada Digital |
| Pulsador de Emergencia | Entrada Digital |
| Selector (Automático/Manual) | Entrada Digital |
| Pulsador de Inicio | Entrada Digital |
| Pulsador para apagar alarma | Entrada Digital |
| Conmutador de dos estados Válvula de entrada (manual) | Entrada Digital |
| Conmutador de dos estados Válvula de salida (manual) | Entrada Digital |
| Válvula de entrada de aire | Salida Relé |
| Válvula de Salida de aire | Salida Relé |
| Sirena | Salida Relé |
| Alarma | Salida Relé |
| Ventilador | Salida Relé |
| Primer grupo de SSR | Salida Digital |
| Segundo grupo de SSR | Salida Digital |
| Sensor de Presión | Entrada Analógica |
| Termocupla tipo J | Entrada Analógica |
| Termocupla tipo J | Entrada Analógica |

Tabla 4.5 Asignación de Entradas y Salidas (elaboración propia)

Tomando en cuenta la cantidad de entradas y salidas necesarias para la automatización, basados en la Tabla 4.5, y el algoritmo de control que se desea emplear; se procedió a la selección del controlador óptimo para este trabajo, se comparó para este fin a dos PLC's de distintas marcas reconocidas en el mercado cada una con un modelo diferente. La marca Siemens representa el modelo Logo! 24 y la marca Telemecanique representa el modelo Twido Modular. En la tabla 4.6 se puede observar la comparación entre ambos modelos a fin de que se pueda llegar a entender la elección final del equipo.

| | LOGO! 24 | Twido Modular |
|--------------------------|----------|-------------------|
| Alimentación | 24 Vdc | 24 Vdc |
| Entradas | 8 | 12 |
| Salidas | 4 | 6 |
| Entradas Análogas | 2 | 2 |
| Salidas Análogas | 0 | 2 |
| Función PID | no | Si |
| Comunicación | ---- | Modbus / Untilway |
| Lenguaje de Programación | Ladder | Ladder / Grafcet |

Tabla 4.6 Comparación de controladores

Para ambos controladores es posible añadirles módulos de expansión a fin de poder tener control de las señales analógicas y las salidas digitales. Realizando las comparaciones de los PLC con la tabla 4.5 se puede apreciar que el Twido Modular se ajusta mejor a las necesidades del proyecto.

Una de las principales razones por la cual se eligió este PLC es debido a que posee con un algoritmo PID el cual servirá para el control de la temperatura, así evitando usar un control on-off que podría también ser manejado con el Logo. Además, este equipo presenta la facilidad de poder comunicarse con distintos HMI's gracias a los protocolos de comunicación que maneja.

Se escogió el modelo de controlador Twido Modular que posee 20 Entradas/Salidas y al cual se le ha añadido dos módulos de Entrada/Salida Analógicas designados para el control de las válvulas, las termocuplas y el sensor de presión. Los datos técnicos más importantes que se han tomado en cuenta son los que se muestran en las Tablas 4.7 y 4.8.

| Canales | Tipo de canal | Tipo de E/S | Fuente de alimentación |
|---------|---------------|--|------------------------|
| 12 | Entradas | 24 Vdc | 24 Vdc |
| 6 | Salidas | Relé | |
| 2 | Salidas | Transistor de común negativo (Canal P) | |

Tabla 4.7 Controlador Base
(Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware)

| Módulo | Canal | Tipo de Canal | Detalles |
|---|-------|---------------|----------------------------|
| 2 entradas de nivel superior/ 1 salida | 2 | Entrada | 12 bits, 0-10 V, 4-20mA |
| | 1 | Salida | 12 bits, 0-10 V, 4-20mA |
| 2 entradas de nivel inferior/ 1 salida de nivel superior | 2 | Entrada | Termocupla de 12 bits, RTD |
| | 1 | Salida | 12 bits, 0-10 V, 4-20 mA |

Tabla 4.8 Módulos de E/S Analógicas
(Controlador Programable Twido Guía de referencia de Hardware)

Según la Tabla 4.5 podemos apreciar que se necesitan 2 salidas digitales para poder controlar los relés de estado sólido. El controlador escogido tiene la capacidad de generar a través de sus salidas de Transistor Común Negativo (Canal P) señales del tipo Modulación de Ancho de Pulso (PWM) necesarias para controlar los relés.

Teniendo en cuenta que la corriente máxima de carga que soportan estas dos salidas digitales es de 1 A, con corriente de carga nominal de 0,3 A por salida y que la cantidad de corriente consumida por un relé no sobrepasa los 20mA, obtenemos:

$$\text{Corriente}_{\text{consumida}} \leq 300 \text{ mA}$$

$$\text{Corriente}_{\text{consumida}} = 6 \times 20 \text{ mA}$$

$$\text{Corriente}_{\text{consumida}} = 120 \text{ mA}$$

La cantidad de corriente consumida por los 6 relés de estado sólido es de 120mA por lo tanto con una sola salida de tipo transistor común negativo se

podrá realizar el trabajo. Luego de tener el PLC con las dimensiones adecuadas, se designarán las entradas y salidas. En la Tabla 4.9 se podrá encontrar las direcciones, símbolos y la descripción de cada entrada empleada.

| Dirección | Símbolo | Descripción |
|-----------|---------------------------|---|
| %I0.1 | Automático_Manual | Selector Automático-Manual |
| %I0.2 | Puerta | Estado de la puerta |
| %I0.3 | Emergencia | Parada de Emergencia |
| %I0.4 | Inicio | Inicio de proceso |
| %I0.5 | Alarma OFF | Apaga la alarma |
| %i0.6 | Válvula de Entrada Manual | Habilita la entrada de aire en forma manual |
| %I0.7 | Válvula de Salida Manual | Habilita la salida de aire en forma manual |
| %Q0.0 | Variable Control 1 | Señal PWM del PID 0 |
| %Q0.1 | Variable Control 2 | Señal PWM del PID 1 |
| %Q0.2 | Foco Indicador | Autoclave funcionando |
| %Q0.3 | Alarma | Sonará cuando no se abre la puerta después de terminar el proceso |
| %Q0.4 | Válvula Entrada | Ingreso de aire |
| %Q0.5 | Ventilador | Prende o apaga el ventilador |
| %Q0.6 | Válvula Salida | Salida del aire |
| %Q0.7 | Sirena | Sonará cuando termine el proceso |
| %IW1.0 | Sensor Presión | Sensor de presión |
| %IW2.0 | Termocupla 1 | Señal de la primera termocupla |
| %IW2.1 | Termocupla 2 | Señal de la segunda termocupla |

Tabla 4.9 Designación de las entradas y salidas del PLC (elaboración propia)

En la figura 4.7 se muestra el diagrama esquemático del equipo a usar

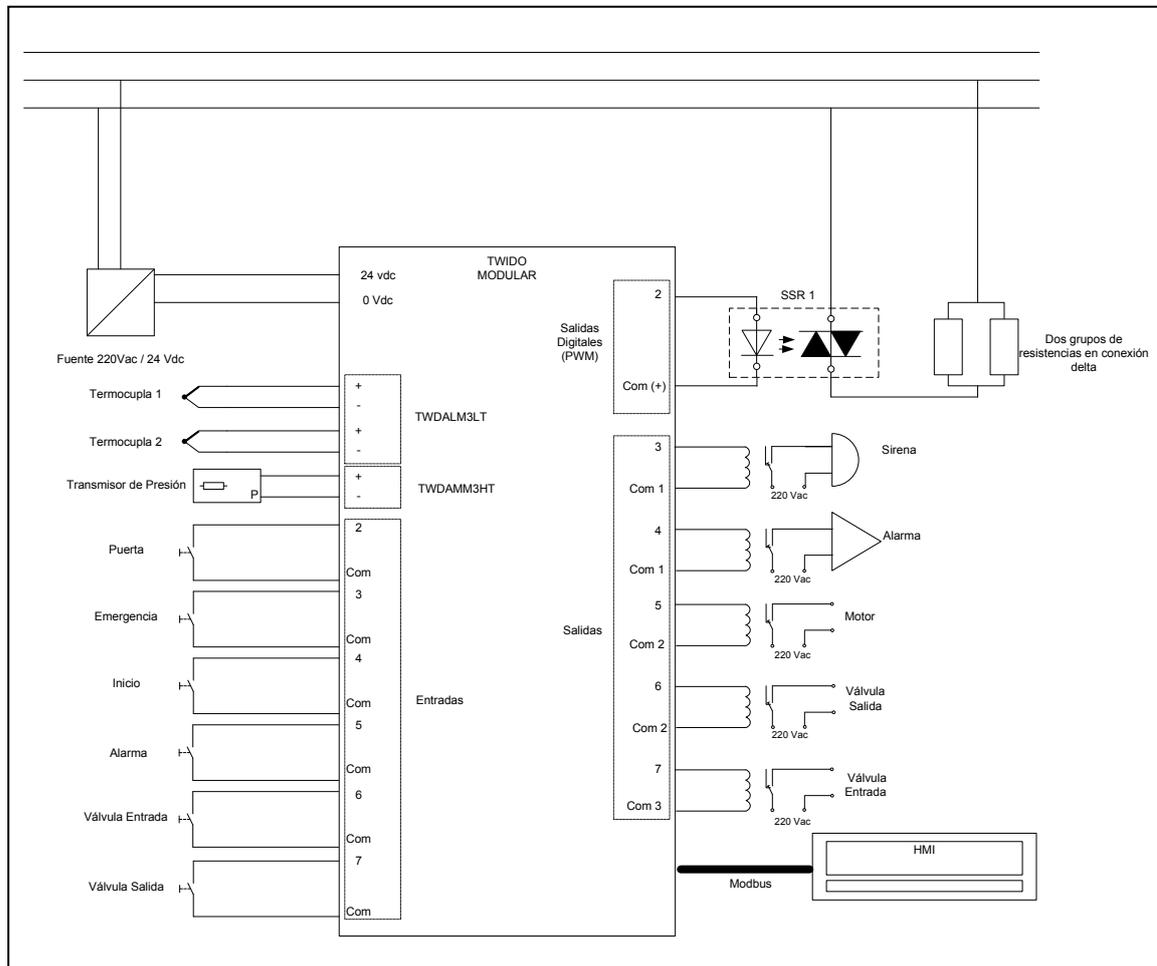


Fig. 4.7 Diagrama Esquemático (elaboración propia)

Comunicación

Para que el nivel de Control Básico pueda comunicarse con el nivel de Supervisión es necesario definir el tipo de protocolo que se utilizará para vincular estos dos niveles. El protocolo de comunicación definido en este caso para que el PLC pueda comunicarse con el HMI es de tipo MODBUS y los parámetros configurados se muestran en la Tabla 4.10.

| | |
|----------------------|---------|
| Velocidad en baudios | 19200 |
| Bits de Datos | 8 (RTU) |
| Paridad | Ninguna |
| Bits de Parada | 1 |
| Timeout de respuesta | 1s |
| Tiempo de espera | 10 ms |

**Tabla 4.10 Parámetros de configuración del protocolo MODBUS
(Controlador Programable Twido- Guía de referencia de Hardware)**

Con esta estructura se busca tener una perfecta comunicación entre el segundo y el tercer nivel de la pirámide de automatización. La conexión que el Twido brinda para realizar esta comunicación es del tipo RJ-45 Mini-DIN, al cual se le conecta un cable XBTZ980 de la marca Telemecanique, diseñado para soportar el protocolo Modbus. La definición del protocolo escogido se dará en la etapa de Supervisión.

4.2.4 Supervisión

El tercer nivel de la pirámide de automatización está referido a la supervisión del control que se ha desarrollado. El encargado de realizar esta etapa es la interfase hombre-máquina (HMI); para este propósito se ha escogido un display más teclado de la familia Telemecanique de tal forma que pueda ser compatible, con respecto a los protocolos de comunicación, con el Twido Modular.

Como se mencionó en el apartado anterior, el protocolo de comunicación escogido es Modbus (todos los parámetros han sido especificados en la etapa de control básico, ver Tabla 4.9 Parámetros de configuración del protocolo MODBUS).

4.2.4.1 Protocolo Modbus

El protocolo Modbus es un protocolo maestro/esclavo que permite a un único maestro solicitar respuestas de los esclavos o realizar acciones dependiendo de las solicitudes. El maestro puede dirigirse a los esclavos individuales o iniciar un mensaje de difusión para todos los esclavos. Los esclavos devuelven un mensaje (respuesta) a las solicitudes que se les envían individualmente. No se devuelven respuestas a las solicitudes de difusión desde el maestro.

Los controladores pueden ser configurados para transmitir en cualquiera de los dos tipos de comunicación serial utilizando Modbus: ASCII o RTU (Remote Transmittion Unit). Esto define como la información será empaquetada en la trama del mensaje y como será decodificada. En la figura 4.8 se puede apreciar que la trama tipo ASCII se diferencia por tener un encabezamiento (: 3A_H) y los caracteres CR y LF (carriage return-line feed pair, ASCII 0D_H y 0A_H)

| | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|
| : (3A _H) | Nº Esclavo (00-3F _H) | Código de Operación | Subfunciones , Datos | LRC(16) H L | CR (0D _H) | LR (0A _H) |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|

Codificación ASCII

| | | | |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| Nº Esclavo (00 – 3F _H) | Código de Operación | Subfunciones, Datos | CRC(16) H L |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|----------------|

Codificación RTU

Fig 4.8 Trama genérica del mensaje según el código empleado

Para la comunicación entre el HMI y el Twido se ha escogido la comunicación RTU ya que ésta es más eficiente al poder transmitir una mayor cantidad de información al mismo flujo de datos que si se enviaran usando la comunicación con ASCII.

La conexión necesaria para realizar la comunicación se da a través de un controlador base provisto de un puerto EIA RS-485 con conector mini DIN.

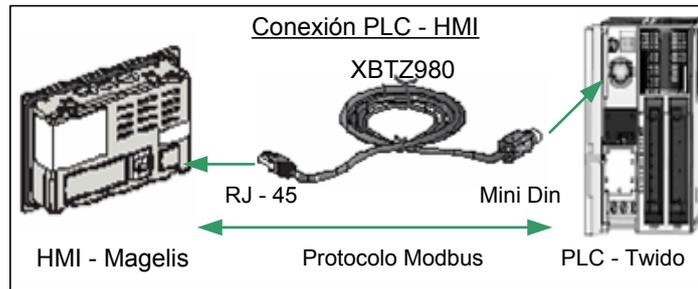


Fig 4.9 Conexión PLC – HMI (elaboración propia)

Se utiliza un enlace directo de datos para la transmisión de informaciones entre el Twido y el HMI: por su configuración el enlace es de tipo punto a punto. Al tener un enlace punto a punto la información que es intercambiada puede ser inicializada por cualquier controlador (PLC o HMI). Estos controladores trabajarán tanto como maestro o esclavo en transacciones separadas.

Una característica importante de la comunicación por Modbus RTU, es que tanto el HMI como el PLC deben de tener direcciones a las cuales destinar la información. En el caso del HMI, se utilizará una dirección base %MW500 la cual irá incrementando de valor en una unidad dependiendo del tipo de información intercambia con el PLC, por lo tanto en el Twido se reserva un espacio de memoria con la misma dirección base para la transferencia de datos.

4.3 Programación del PLC y el sistema de supervisión

La programación del sistema implementado esta dividida en dos partes, una de ellas corresponde a la programación del PLC basado en la herramienta Grafcet, y la segunda parte corresponde a la programación necesaria para que el autómatas se comunique con el operario (programación de la interface hombre-máquina).

Durante el desarrollo de ambos programas, tanto del PLC como el de la interface, se ha buscado describir el proceso de la manera más simple.

4.3.1 Introducción al Gráfico Funcional de Control de Etapas y Transiciones

Realizar un programa simple y eficiente, donde el desarrollo del algoritmo de control sea basado en el método secuencial que se realizó en forma manual para poner en funcionamiento la autoclave.

El GRAFCET, cuyo nombre deriva de GRÁfico Funcional de Control de Etapas y Transiciones (en francés GRAphe Fonctionnel de Commande Etapes-Transitions), tiene como propósito inicial la puesta de un método de descripción de procesos, independientemente de la tecnología de los mismos, mediante un gráfico funcional interpretable fácilmente por personas no especialistas en automatización. La característica principal de la herramienta de diseño Grafcet es que ésta descripción de procesos es ejecutada de manera secuencial; en este caso se divide en etapas las diferentes funciones de trabajo de la máquina obteniendo una secuencia de operaciones que buscan asemejarse al trabajo realizado por el operario y por el control anterior pero de una manera más eficiente.

Los elementos básicos para poder entender un diagrama GRAFCET son los Estados y las Transiciones (ver Fig. 4.10). Se entiende por:

- 1) Estado, a cada una de las etapas en las cuales, cuando son activadas, se ejecutarán diferentes acciones del proceso de automatización.
- 2) Transición, condición lógica que permite la activación de los estados y así genera una secuencia de acción entre ellos.

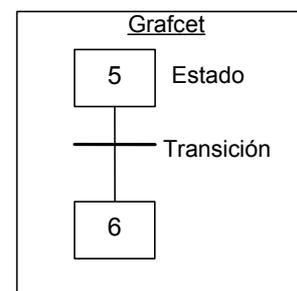


Fig. 4.10 Grafcet

4.3.2 Programación del Autómata

El software de programación del Twido Modular (Twidosoft) admite la herramienta GRAFCET, realizando un programa equivalente en LADDER para que pueda ser entendido por el autómata.

Debemos destacar que dentro de la programación del controlador lógico programable se encuentran los comandos necesarios para la comunicación con la interface hombre-máquina. Las pantallas y los datos que se transfieren desde el PLC al HMI se describirán en la programación del software del HMI. El lector podrá encontrar a continuación la descripción del programa desarrollado.

El programa del autómata está basado en tres tareas principales que se ejecutan simultáneamente, es decir, el PLC realizará el trabajo conocido como multitarea para poder controlar los tres parámetros críticos en el proceso de vulcanización. Para poder entender mejor el programa es necesario ver el anexo N° 6 donde se podrá observar el diagrama de flujo del programa y la Fig. 4.11 “Gráfica de Control de Etapas de Transición del Programa Principal”, para ver el diagrama grafcet de programa desarrollado.

El programa comienza con la lectura del estado de la señal proveniente de la puerta, este programa se encuentra en un lazo cerrado que simplemente espera que se cierre la puerta para poder comenzar el trabajo. Al mismo tiempo existe una etapa que se ejecuta cuando el grafcet no está desactivado, esta es llamada POST, en ella podremos encontrar que el estado de la alarma es dependiente del estado de la puerta (se explicará el funcionamiento de esta etapa mientras se detallan las tres tareas principales), y será tomada en cuenta como parte inicial del programa. Una vez que la puerta se cierre comenzará a ejecutarse el GRAFCET (traducido en el lenguaje escalera).

Cuando se inicia el GRAFCET (**Estado inicial 1**), se distinguirá si se desea variar el tiempo de trabajo desde el HMI o se trabajará con los tiempos fijados según el estudio realizado. Por lo tanto antes de la divergencia en Y, se condiciona el inicio de nuestro programa con dos posibles elecciones:

- Cantidad de pares y tallas del calzado (mediano, grande o pequeño) que ingresan a la autoclave: Estos parámetros conllevan a fijar un tiempo llamado TIEMPO FINAL de trabajo (relacionado con un temporizador en la etapa de Control de Tiempos del programa).
- Elección del Tiempo. Para realizar las pruebas con nuevos calzados es necesario tener la opción de variar el tiempo durante el cual el calzado está sometido a temperaturas elevadas, de tal forma que se pueda verificar la reacción de los nuevos químicos añadidos al calzado. Gracias a este nuevo sistema se podrá variar el tiempo de trabajo de la autoclave por medio de la interfase hombre-máquina.

Al término de la elección se almacenará en memoria la cantidad de pares que está ingresando a la autoclave y éstos se sumarán cada vez que se cargue la autoclave para poder obtener la cantidad de pares producidas al día, esta automatización eliminará uno de los problemas que se tenían con el modo manual de operación, ya que los operarios dejarán de apuntar en una pizarra la cantidad de pares que ingresan a la autoclave cada vez que terminan la ronda de armado de calzado. Conjuntamente al registro de producción se activará el motor del ventilador que ayudará al proceso de absorción de calor que necesita el calzado. **(Estado 3)**. Una vez seleccionado los primeros parámetros empezarán a trabajar las tres etapas del programa.

Gráfica de Control de Etapas de Transición del Programa Principal

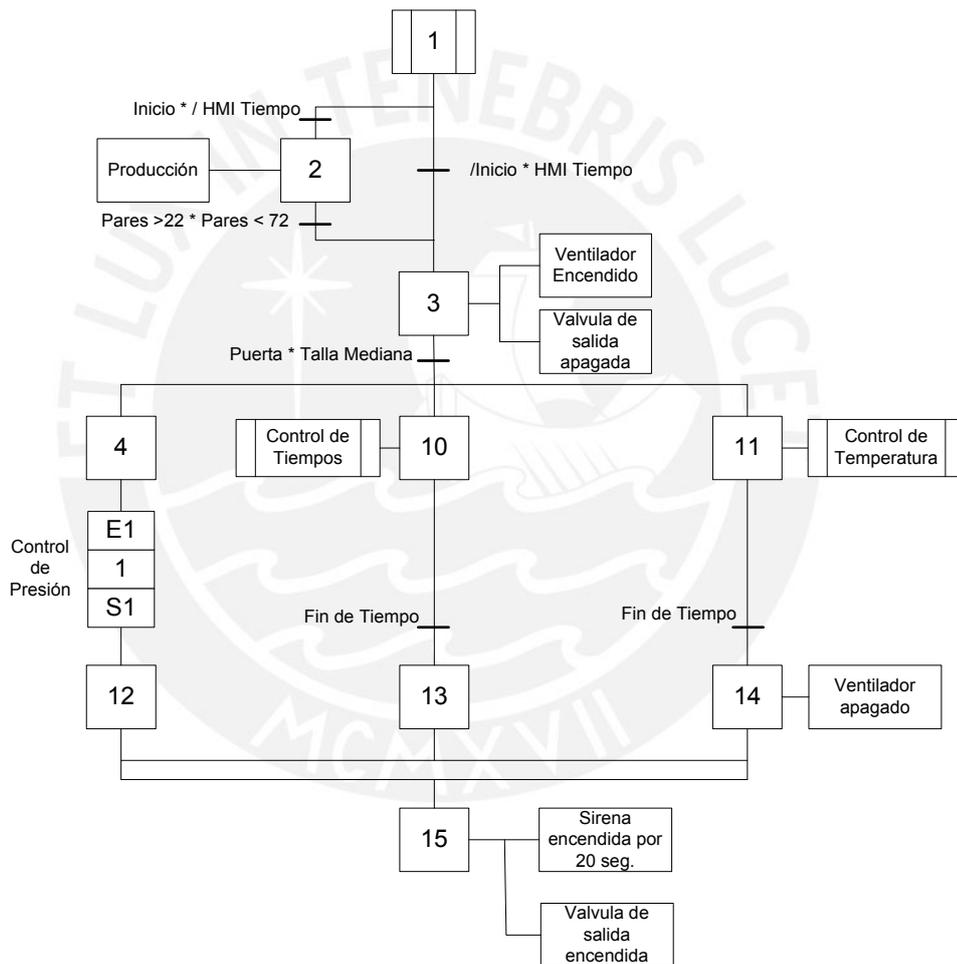


Fig. 4.11

4.3.2.1 Control de Presión (Estado 4 al Estado 9)

Para abastecerse de aire tanto la autoclave como otras máquinas dentro de la empresa, tienen a su disposición un tanque de almacenamiento de aire (tanque pulmon), el reciente problema encontrado es que debido a su poca capacidad de almacenamiento, el suministro de aire no es el adecuado para todas las máquinas, esto quiere decir que en muchas ocasiones la autoclave no logra llenar el aire necesario en su interior debido a que otras máquinas agotan el volumen de aire del tanque. Es por tal motivo que los operarios al momento de suministrar aire a la autoclave cierran la válvula de entrada cuando llegan a una presión por debajo de la requerida y esperan un tiempo para nuevamente abrir dicha válvula hasta llegar a la presión requerida. Este tiempo de espera ayuda a que la compresora llene nuevamente el tanque para poder seguir suministrando aire.

Según lo explicado se ha diseñado un programa que trabaje en forma escalonada (ver Fig. 4.12); se generarán tres escalones en los cuales la presión interna se elevará hasta alcanzar la presión fijada, dejando un lapso de tiempo entre cada escalón para que el tanque pueda llenarse nuevamente y alimente con el volumen de aire necesario a la autoclave. A continuación se encuentran los pasos de este nuevo proceso para el control de presión:

- Primero, la presión se elevará hasta alcanzar un valor igual a 1 kg/cm^2 , luego esperará un tiempo T_{p1} requerido para que el tanque pueda ser llenado nuevamente. El tiempo de presión T_{p1} puede ser variado vía el HMI.
- Segundo, una vez alcanzado este tiempo, se procederá a elevar la presión interna de la autoclave hasta alcanzar 2.5 kg/cm^2 . Nuevamente se esperará un tiempo T_{p2} hasta que nuevamente sea abierta la válvula de ingreso de aire. Y finalmente

- Tercero, con la válvula de ingreso abierta, incrementamos la cantidad de aire dentro de la autoclave hasta alcanzar la presión de 3.5 kg/cm².

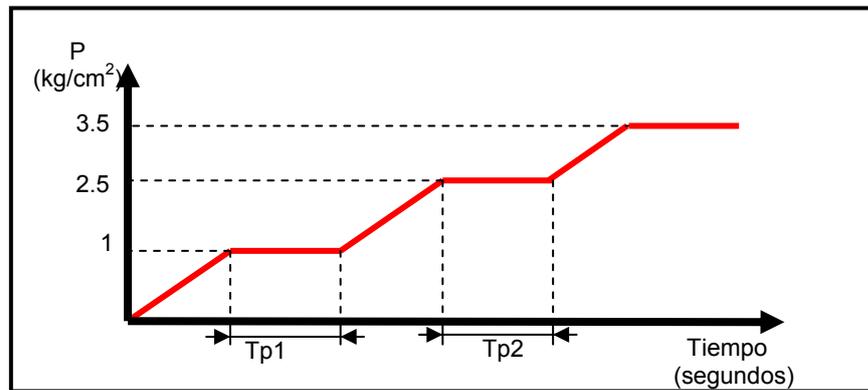


Fig 4.12 Algoritmo del Control de Presión

Como se puede apreciar en el Esquema 3, el control de la presión será secuencial y tendrá a su cargo el accionamiento de las válvulas solenoides de nuestro sistema, tanto la válvula de entrada como las de salida de aire estarán controladas en esta rutina.

Los valores de presión leídas por el transmisor serán enviados en tiempo real al nivel de supervisión; en el HMI se podrá visualizar que los valores de presión sean los correctos y que el funcionamiento de las válvulas sea el adecuado.

En caso se desee controlar manualmente el ingreso o salida del aire, se añadirá al tablero de control dos conmutadores que habilitaran las válvulas solenoides.

4.3.2.2 Control de Tiempos (Elemento 10)

Se debe tomar en cuenta que el tiempo es una variable que debe ser controlada de manera adecuada porque si el calzado es expuesto a temperaturas elevadas durante un tiempo excesivo, este puede ser perjudicial para las características físicas del calzado, el peor de los casos puede darse cuando la suela se quiebre y que el material que acompaña a ésta pierda el color que inicialmente tenía.

Para controlar el tiempo, ha sido necesario utilizar cuatro temporizadores.

- El primero registrará el tiempo de trabajo total de la máquina, este tiempo será enviado a la interfase con el operario.
- El segundo registrará el tiempo de subida de la señal de temperatura, cuando éste alcance la consigna se desactivará.
- El tercer temporizador controlará el TIEMPO FINAL de trabajo que le queda a la autoclave para terminar el proceso de vulcanización, es por esto que realizará una cuenta regresiva que será mostrada también por el HMI. El tiempo final es considerado desde el momento en que la temperatura llega a la consigna hasta el tiempo en que se termina el proceso de vulcanización dentro de la autoclave.
- El cuarto temporizador se encargará de controlar el tiempo en caso se elija la opción de Elección del Tiempo por el HMI, el cual descartará el trabajo del tercer temporizador. Como se explico anteriormente este temporizador servirá en caso se deseen hacer pruebas con nuevos calzados.

Se debe destacar que el tercer temporizador puede ser considerado como el principal entre los cuatro mencionados. En el momento que termine su cuenta regresiva este temporizador será la condición principal para el encendido de la sirena e indica que el proceso ha concluido.

Dentro del estudio realizado a la máquina se ha podido encontrar una tabla que fija los tiempos necesarios en los cuales deben de trabajar las resistencias una vez alcanzado un valor en estado estable. El anexo 15 muestra la tabla en la cual se podrá observar los tiempos necesarios para trabajar con calzado que varia entre las tallas medianas considerados dentro de la categoría de calzado mediano.

4.3.2.3 Control de Temperatura (Estado 11)

Se busca desarrollar un control de temperatura que reemplace al control ON – OFF utilizado actualmente, por lo tanto se ha implementado un nuevo algoritmo de control para la temperatura basado en el algoritmo PID. Cada uno de los bloques comandará un grupo de 6 resistencias calefactoras, de esta manera se trata por separado el funcionamiento de las mismas para que en caso ocurra algún desperfecto en alguna de las resistencias pueda ser controlado por separado del otro grupo variando los tres parámetros de sintonización.

El funcionamiento del lazo de regulación PID comprende tres fases distintas:

- 1) La adquisición de datos: Medidas provenientes de los captadores del proceso, y la consigna proveniente, generalmente, de variables internas del PLC del HMI.
- 2) La ejecución del algoritmo de regulación PID,
- 3) El envío de los comandos adaptados a las características de los accionadores que se van a controlar a través de las salidas PWM.

El algoritmo PID elabora la señal de comando a partir de:

- Las muestras tomadas por el módulo de entrada,
- El valor de la consigna fijada bien por el operador, o bien por el programa.

Como consecuencia de este nuevo control, el lazo cerrado muestra las siguientes variables:

| VARIABLES DE CONTROL | DESCRIPCIÓN |
|----------------------|---|
| Variable de Proceso | Señales provenientes de las termocuplas |
| Variable de Control | Modulación de ancho de pulso generada por el autómeta |
| Consigna | Temperatura requerida para el trabajo |

Tabla 4.11 Variables de Control

Dentro de las características técnicas de la autoclave encontramos que ésta compuesta por dos grupos de 6 resistencias calefactoras. Ambos grupos de resistencias son controlados por dos contactores los cuales serán reemplazados por los relés de estado sólido. El PLC entonces será el encargado de generar dos señales PWM que comanden los SCR para regular la temperatura. La dirección de ambas salidas del PLC puede ser observadas en la tabla 4.9 (Designación de entradas y salidas del PLC).

Para la sintonización del PLC es necesario que por medio del HMI se elijan los valores tanto de la ganancia proporcional (K_p), el tiempo derivativo (T_d), y el tiempo integral (T_i) del PID.

Durante el proceso de investigación de esta tesis se pudo obtener un gráfico del control ON-OFF (véase anexo 14: Resultados Control On-Off) que se viene empleando, el cual muestra como varía la temperatura con respecto del tiempo de trabajo de la máquina. Enfocándonos solamente en la etapa del tiempo de subida de la señal de control, es decir en el rango de trabajo de 1 a 11.15 minutos, calcularemos el tiempo de muestreo que necesitaremos para sintonizar nuestro algoritmo PID.

Tomando la relación práctica para hallar el tiempo de muestreo tenemos:

$$Tiempo_muestra = \frac{11.15 \times 60s}{10}$$

$$Tiempo_muestra = 66.90segundos$$

El valor obtenido es introducido en la configuración del PID dentro del Twidosoft (software de programación del PLC) en milisegundos. Por lo tanto solo quedaría escoger los valores de los parámetros de sintonización de nuestro algoritmo de control.

Los Estados 12, 13 y 14 se encargarán de desactivar los controles de presión, tiempos y temperatura, respectivamente.

Finalmente, terminado el trabajo en el Estado 15 se accionarán la sirena indicando que el trabajo de vulcanización ha terminado y que el calzado puede ser retirado de la autoclave. Al mismo tiempo se abrirá la válvula de salida para que aire comprimido pueda salir al exterior, a través de una tubería que da a la parte superior de la planta, de tal forma que no llegue a los trabajadores. Una vez que el aire salga de la autoclave el operario podrá abrir la puerta y retirar el calzado.

Se le agrega a nuestro programa una alarma que sonará en caso no se haya retirado el calzado después de dos minutos. Esto indicará al operario que el calzado puede presentar desperfectos si permanece más tiempo dentro de la autoclave ya que el excesivo calor puede quitarle propiedades elásticas al caucho. La alarma se desactivará en el preciso momento que se abra la puerta.

4.3.3 Programación de la Interface Hombre-Máquina

Para poder supervisar el trabajo fue necesario añadirle al sistema una pantalla LCD que sirva como interfase entre el operario y el PLC. Se utilizó el software XBT-L1000 V4.20 light para programar la pantalla MAGELIS de la marca TELEMECANIQUE.

Las funciones principales que planteamos con el uso del Magelis son:

- Visualizar datos procedentes del PLC
- Modificar los parámetros del PLC
- Dirigir un proceso con ayuda de los mandos Todo o Nada
- Crear varios tipos de páginas:
 - Páginas de aplicación
 - Páginas de alarma

El protocolo de comunicación industrial MODBUS explicado en la etapa de supervisión de este trabajo, es el empleado para la transferencia de datos entre el Twido y el Magelis, por lo tanto se ha configurado éste protocolo en el software del Magelis respetando los datos de la Tabla 4.9 (Parámetros de configuración del protocolo MODBUS).

En este caso al tener solo un autómatas que intercambiará información con la pantalla escogeremos la conexión punto a punto. A continuación, en la Tabla 4.12, se resumirán las características tomadas en cuenta para el uso de la pantalla Magelis.

| Características | Descripción |
|---------------------------|--------------------------------|
| Modelo | XBTN 400 |
| Alimentación | 5 Vcc por el autómatas |
| Arquitectura | Enlace Punto a Punto |
| Protocolo de comunicación | Modbus |
| Conexión | Conector RJ 45 |
| Visualización | 2 x 20 caracteres alfanumérico |

**Tabla 4.12 Características de la pantalla Magelis
(Visualizadores compactos Magelis XBT N/XBT R)**

4.3.3.1 Página de Aplicación y Alarmas

Se han desarrollado en total 14 pantallas para que el operario pueda monitorear la autoclave, todas ellas han sido probadas y verificadas. Debemos destacar que todos los datos son llevados en tiempo real, de esta forma el operario no tendrá problemas para supervisar la temperatura que es una de las variables más críticas a controlar. A continuación se describirá brevemente el contenido de cada pantalla:

- 1) **Saludo:** Esta será la primera pantalla que el operario podrá ver antes de empezar el trabajo.
- 2) **Listado de Páginas:** Es la pantalla principal de nuestro trabajo, ésta será la raíz de todas las pantallas empleadas. El operario encontrará una lista de todas las páginas que a continuación se explican para que pueda escoger a cual de ellas entrar y supervisar los datos correspondientes a cada una de ellas.
- 3) **Calzado:** En ella se especificarán la cantidad de pares y la talla de las zapatillas. Existe la opción “Elección de Tiempo” que corresponde a la elección de tiempos mencionados en el control de tiempos, si el operario selecciona esta opción podrá ingresar a otra pantalla llamada “Elección del tiempo de trabajo total”. Además desde esta pantalla podremos indicar el inicio de nuestro proceso.
- 4) **Elección del tiempo de trabajo total:** Relacionada con la pantalla “Calzado”, en ella el operario podrá variar el tiempo de trabajo del cuarto temporizador explicado en la etapa de control de tiempos.
- 5) **Entradas/Salidas:** Se podrán ver los estados de las entradas y salidas digitales (ventilador, válvulas, sirenas y alarma). El operario no podrá variar ningún estado de las entradas o salidas digitales.

- 6) **Supervisión:** El operario podrá visualizar la presión, temperatura y los tiempos de trabajo de la autoclave (total, subida y final).
- 7) **Temperatura:** En ella podrá ver y variar la consigna del PID, y podrá visualizar los valores de las dos termocuplas instaladas en la autoclave.
- 8) **PID:** Esta pantalla solo puede ser accedida en caso se tenga la contraseña, en este caso las únicas personas que pueden tener acceso a esta pantalla son los técnicos y el programador. En esta pantalla se pueden variar los parámetros de Kp, Td y Ti. Se debe de tener en cuenta que estos parámetros sólo pueden estar dentro de los rangos especificados en la Tabla 4.15 “Rango de valores de sintonía”.
- 9) **Producción:** Muestra la cantidad de pares que se están produciendo hasta el momento, esto evita que los operarios escriban estos valores en una pizarra.
- 10) **Control Manual de Presión:** En caso se desee trabajar con un control manual de la presión, desde esta pantalla el operario podrá variar los estados de las válvulas de entrada y salida de aire. El operario tiene también la opción de variar los estados de las válvulas gracias a los dos conmutadores que se encuentran en el tablero de control.
- 11) **Contraseña:** Relacionada con la pantalla PID, solo si se tiene la clave adecuada podrá ingresar a la pantalla PID.
- 12) **Alarmas:** Muestra la relación de alarmas ocurridas durante el día. Actualmente se encuentran desarrolladas dos alarmas, una de ellas corresponde a la llamada “Retirar Calzado” la cual está relacionada con el temporizador de la alarma explicado en la programación del autómatas (elemento 15). La segunda alarma está relacionada con el estado de la puerta.

- 13) **Fecha/Hora:** Pantalla del sistema en la cual el operario puede variar los valores cuando lo desee.

4.4 Diseño Eléctrico

Al trabajar con intensidades de corrientes elevadas, resulta necesario la correcta selección de conductores y elementos de control a utilizar (termomagnéticos, relés, relés de estado sólido, etc.). Una mala selección en el diámetro de un cable podría traer como consecuencia calentamiento del mismo y en el peor de los casos una rotura que podría traer como consecuencia cortocircuitos. Además, una mala conexión de los conductores, con los elementos de control o con sus respectivos terminales, puede ocasionar arcos eléctricos que dañan el sistema.

En esta etapa se mostrarán los diferentes elementos escogidos para el diseño del tablero de control de la autoclave, todos estos seleccionados según la intensidad de corriente que deberá soportar cada uno de ellos para un trabajo adecuado. Todos los planos eléctricos de este nuevo sistema se adjuntan a este trabajo en el anexo 2.

4.4.1 Características eléctricas de las resistencias

La autoclave consta de doce resistencias calefactoras divididas en dos sectores, las cuales representan la carga trifásica, con conexión eléctrica en triángulo, debido a que todas las resistencias presentan las mismas impedancias son consideradas una carga balanceada (véase: anexo 2.3 y anexo 2.4 Control de Resistencias calefactoras). Cada fase de la conexión delta tendrá dos resistencias en paralelo. Teniendo en cuenta dicha conexión obtenemos:

$$I_L = \sqrt{3} \times I_F$$

$$I_F = 20 \text{ A.}$$

$$I_L = 34.64 \text{ A.}$$

$$P_R = V_F \times I_F = 220 \times 20 = 4400$$

$$P_{\text{Grupo 1}} = P_{\text{Grupo 2}} = 3 \times P_R = 13.2 \text{ KW}$$

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{Grupo 1}} + P_{\text{Grupo 2}} = 26.4 \text{ KW}$$

Por lo tanto, las resistencias calefactoras muestran las siguientes especificaciones eléctricas:

| | |
|--|-------------------------|
| Intensidad de corriente por cada resistencia | $I_R = 10 \text{ A}$ |
| Intensidad de corriente por fase | $I_F = 20 \text{ A}$ |
| Intensidad de corriente por línea | $I_L = 34.64 \text{ A}$ |
| Potencia consumida | $P = 26.4 \text{ Kw}$ |

Tabla 4.13 Resistencias Calefactoras

Con estas características se procede a obtener los valores de corrientes de diseño para poder escoger los relés de estado sólido, llaves termomagnéticas, fusibles y conductores necesarios para el control de temperatura.

- Intensidad de corriente de diseño: $I_d = 1.25 \times 20 = 31.25 \text{ A}$
- Llaves termomagnéticas trifásicas: $I_{ITM} = I_L = 34.64 \text{ A}$ (cada una)
- Fusible: $I_F = I_R \text{ (fase)} = 20 \text{ A}$
- Conductor: Para conectar las resistencias calefactoras entre si y a la vez al tablero de control, se selecciono un cable siliconado con recubrimiento de fibra de vidrio N° 12 debido a que soporta intensidades de corriente mayores a los 27 A y es ideal para trabajar a altas temperaturas.

- Relé de estado sólido:
Tensión de control = 24 Vdc
Tensión de carga = 220 Vac
Corriente de carga ≥ 20 A

Disipadores de Calor y Protección Térmica:

Una de las consideraciones más importantes a tener en cuenta luego de escoger un semiconductor, es su temperatura de trabajo, ya que de esta depende el comportamiento óptimo que este va a desempeñar. Debido al flujo de corriente a través del semiconductor se presentan pérdidas de calor, las cuales incrementan la temperatura del dispositivo y generan una pérdida de su vida útil.

Para evitar este problema, es necesario refrigerar los relés de estado sólido mediante disipadores. El modelo térmico para un encapsulado y disipador es el siguiente:

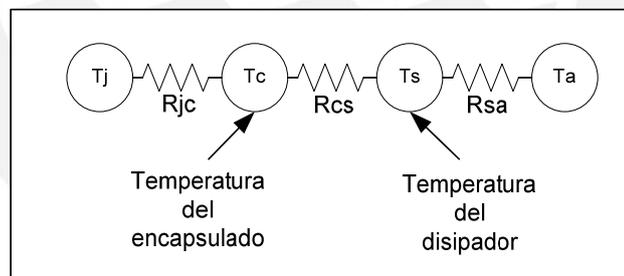


Fig. 4.13 Modelo Térmico (elaboración propia)

Donde:

- Tj:** Temperatura de la junta
Tc: Temperatura del encapsulado
Ts: Temperatura del disipador
Ta: Temperatura de ambiente
Rjc: Resistencia térmica de la junta al encapsulado
Rcs: Resistencia térmica de la cápsula al disipador
Rsa: Resistencia térmica del disipador (incógnita)

El valor de R_{jc} se obtiene de la hoja técnica del fabricante, donde $R_{jc} = 0.5$ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$; además en la hoja de datos del relés de estado sólido se puede encontrar un dato R_{ja} (resistencia entre la junta y el ambiente), donde $R_{ja} = 20$

$^{\circ}\text{C}/\text{W}$; en la hoja técnica es posible encontrar los valores de temperatura de juntura máxima, $T_j = 125^{\circ}\text{C}$, con estos valores es posible encontrar la potencia máxima que puede disipar el relé de estado sólido sin necesidad de usar un disipador de calor:

$$P_{Dm\acute{a}x} = \frac{T_{j\acute{m}ax} - T_a}{R_{ja}} = \frac{125^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C}/\text{W}} = 5.0\text{W}$$

Debido a los 20 A que circulan por el relé de estado sólido y tomando en consideración que el valor del voltaje de salida a través del semiconductor es de 1.6 Vrms, se obtiene una potencia de 32 W, valor mucho mayor a la potencia que puede disipar el dispositivo sin ayuda de un disipador, por lo tanto es necesario el uso de un disipador de calor que logre atenuar la potencia en el semiconductor.

$$P_{disipada} = I_F \times V_{SSR} = 20 \times 1.6 = 32\text{W}$$

Del modelo térmico es posible encontrar el valor de la resistencia térmica del disipador gracias a la ayuda de la siguiente ecuación:

$$T_j - T_a = P (R_{jc} + R_{cs} + R_{sa})$$

Así mismo R_{cs} depende del sistema de fijación del dispositivo y elementos entre ellos, nos referimos a: contacto directo, mica o grasa o una combinación. En este caso utilizaremos grasa, así $R_{cs} = 0.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Despejando la resistencia térmica del disipador al ambiente, se obtiene:

$$R_{sa} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{jc} - R_{cs} = \frac{125 - 25}{32} - 0.5 - 0.2 = 2.125^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Se debe de escoger un disipador de calor que cumpla con las características encontradas.

La ventilación del tablero de control también debe de ser controlada debido a que éste se encuentra situado en un lugar donde la temperatura del ambiente supera los 30 °C y cuya temperatura interna supera los 50 °C, consecuencia del calor emitido por los disipadores, por los cables que soportan corrientes altas y por el entorno de calor al cual es sometido por la cercanía de la autoclave.

Al tener una intensidad de calor alta que puede afectar los equipos electrónicos, se han instalado rejillas y ventiladores con filtros de aire (debido a la cantidad de polvo en la planta industrial), con la finalidad de refrigerar el interior del tablero y poder minimizar la temperatura.

4.4.2 Características eléctricas del motor

La autoclave consta de un motor trifásico que cumple la labor de ventilador para hacer circular el aire uniformemente en el interior de la autoclave. Se emplea un motor de arranque directo, debido a que tiene una potencia menor a los 10 HP, en caso el motor exceda este último valor se recomienda el uso de un arranque estrella-triángulo (Véase anexo 2.1 Arranque directo del motor ventilador).

A continuación se mostrarán los datos de placa del motor y las intensidades de corriente que deben soportar los elementos necesarios para el control del motor:

| | |
|---------------------------------|--------------------------|
| Potencia | 10 HP |
| Factor de Potencia | Fdp =0.83 |
| Intensidad de corriente nominal | $I_N = 20,137 \text{ A}$ |

Tabla 4.14 Motor Eléctrico

Con estos datos procedemos a calcular las intensidades de corriente necesarias para seleccionar los elementos de protección:

- Capacidad de corriente del conductor: $I_C = 1,25 \times I_N = 25,17 \text{ A}$
- Relé Térmico: $I_{RT} = I_N = 20,14 \text{ A}$
- Fusible de potencia: $I_F = 1,3 \times I_N = 26,17 \text{ A}$

4.4.3 Fuente de alimentación

De acuerdo a las necesidades del sistema, es indispensable el uso de una fuente para alimentar al PLC, la cual debe de tener un valor de 24Vdc. (según las características técnicas del equipo este valor no puede sobre pasar los 26.4 Vdc).

La alimentación principal proveniente de las líneas de suministro de energía la cual tiene un valor de 220Vac (RMS) 60 Hz Trifásico; de la cual se tomarán dos líneas para generar la tensión de entrada al transformador (Toma central 24-0-24, 4A).

En la Tabla 4.15 se detalla la intensidad de corriente que consume cada componente para luego calcular la corriente necesaria de la fuente de alimentación.

| Tipo de canal | Descripción E/S | Intensidad de Corriente (mA) |
|------------------|--------------------------|------------------------------|
| Entrada | Selector Manual | 5 |
| | Selector Válvula Entrada | 5 |
| | Selector Válvula Salida | 5 |
| | Pulsador Emergencia | 7 |
| | Pulsador Inicio | 7 |
| | Selector Automático | 7 |
| Salida | Relés grupo 1 | 60 |
| | Relés grupo 2 | 60 |
| | Relé Válvula Entrada | 500 |
| | Relé Válvula Salida | 500 |
| | Relé Sirena | 500 |
| | Relé Alarma | 500 |
| | Relé Contactor Motor | 500 |
| Modulo TWDAMM3HT | Termocuplas | 40 |
| Modulo TWDAM3LT | Transmisor de Presión | 40 |
| TOTAL | | 2743 |

Tabla 4.15 Intensidad de corriente (Elaboración propia)

Para la salida de 24Vdc, se requiere una capacidad de corriente menor a 3 A. La salida del transformador es rectificadora mediante el puente de diodos D1 y D2, filtrada gracias al condensador C1. Esta señal es conectada al emisor del transistor Q2, así mismo a su base a través de R (resistencia con valor bajo). La señal de la base es conectada al regulador de tensión 7824 cuya salida es corto-circuitada con el colector del transistor Q1; el uso del Q2 es para lograr una mayor capacidad de corriente (ver Fig. 4.14).

Se añade a este diseño un transistor Q1 que sirve para proteger al regulador contra cortocircuitos; su colector está conectado a la base del transistor Q2 y sus emisores se conectan a través de la resistencia de potencia Rsc.

Finalmente en la salida del regulador se tiene los filtros a fin de disminuir el rizado a un valor insignificante para el PLC.

Los valores obtenidos para la alimentación del PLC son las siguientes:

- Transformador : 24-0-24 (4 A)
- Diodos rectificadores: 4 A.
- C1= 3300uF
- C2= 10uF
- Q1 y Q2: TIP42
- R= 3 ohms
- Rsc= 0.47 ohms (20 W)

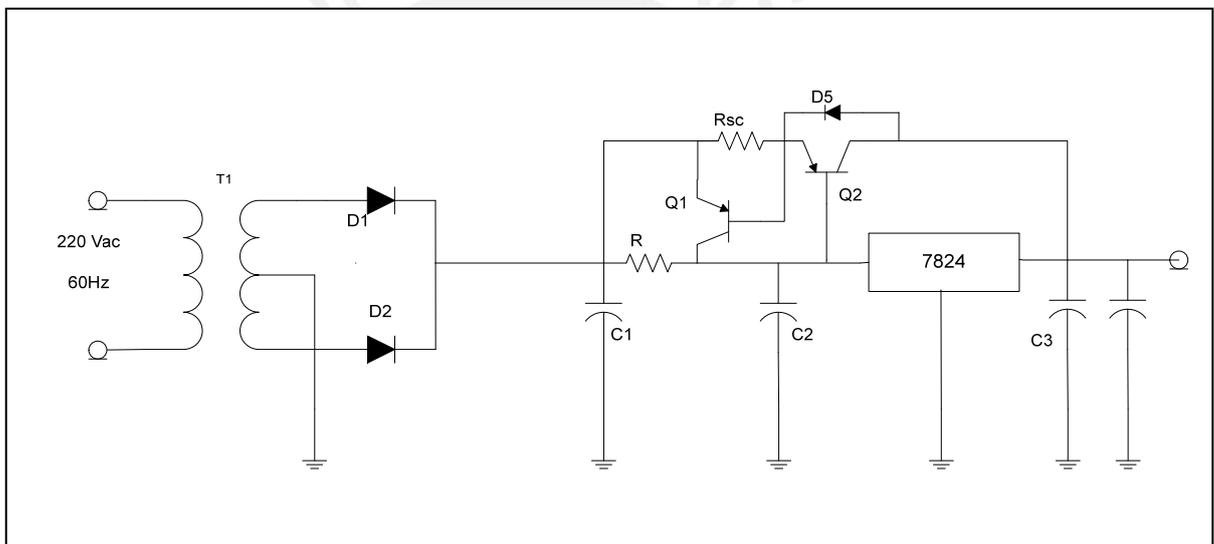


Fig. 4.14 Fuente de Alimentación

Cálculo del disipador de calor:

Del mismo modo que se calculó el disipador de calor para los relés de estado sólido, se procederá a calcular el disipador necesario para el regulador de voltaje 7824 (TO22) [44]. Los datos que se obtienen de la hoja técnica del regulador de voltaje son los siguientes:

$$R_{jc} = 2.2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{ja} = 65 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$T_j = 125^\circ\text{C}$$

$$T_a = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con estos datos se puede hallar la potencia máxima que soporta el regulador de voltaje sin disipador de calor:

$$P_{Dmáx} = \frac{T_{j máx} - T_a}{R_{ja}} = \frac{125^\circ C - 25^\circ C}{65^\circ C/W} = 1.538 W$$

Para obtener la potencia disipada por el regulador de voltaje, es necesario obtener el voltaje que existe entre la entrada del regulador y su respectiva salida, en este caso:

$$V_{in} = V_m - V_\gamma - \frac{V_r}{2} = 24\sqrt{2} - 0.7 - \frac{1.51 \times 10^{-2}}{2} = 33.23 V$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= 24 V \\ I_{out} &= 1 A \text{ (máxima corriente) } \end{aligned}$$

Con estos valores encontrados se procede a encontrar la potencia disipada por el regulador de voltaje:

$$P = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out} = (33.23 - 24) \times 1 = 9.23 W$$

Se puede comprobar que la potencia disipada por el regulador es mucho mayor a la potencia máxima para poder trabajar sin disipador de calor, por lo tanto se procede a calcular la resistencia térmica del disipador:

$$R_{sa} = \frac{kT_j - T_a}{P} - R_{jc} - R_{cs} = \frac{0.7 \times 125 - 25}{9.23} - 5 - 0.5 = 1.27^\circ C/W$$

Donde "k" es un factor de seguridad cuyo valor se recomienda en el intervalo de 0.5-0.7 para evitar que la juntura alcance la temperatura límite.

4.4.4 Actuadores e indicadores

Para el control de las válvulas solenoides, la alarma, la sirena y el contactor del motor, debido a que todos estos actuadores necesitan de alimentación de 220 Vac, se utilizarán 5 relés con tensión de alimentación de 24 Vdc, de tal forma que puedan ser controlados por las salidas del autómatas escogido (véase anexo 2.5 Control de Actuadores e Indicadores).

4.5 Pruebas

Se han realizado un conjunto de pruebas a fin de cumplir los objetivos planteadas con respecto a la automatización de la presión como para la temperatura. Es importante señalar que los parámetros obtenidos al finalizar el trabajo fueron hallados gracias a un control de “prueba y error” que se llevó a cabo a lo largo de la sintonización del PID para controlar la temperatura, y del control de encendido y apagado para controlar la presión.

Como se mencionó anteriormente el nuevo tablero de control debería de trabajar en forma paralela al antiguo tablero de control, de tal manera que ante cualquier tipo de inconveniente sea posible que el antiguo tablero de control continúe a trabajar y continúe el proceso de vulcanización en la autoclave. Por lo tanto, al principio se realizó un algoritmo de encendido y apagado para poder controlar la temperatura, de esta forma se verificaban los datos que enviaban las termocuplas al PLC y se comparaban con los datos que entregaban los pirómetros instalados en el antiguo tablero. De la misma forma se verificaba que los datos enviados por el transductor de presión sean los correctos y se comparaban con las lecturas del manómetro.

Para realizar las pruebas de presión se han definido los siguientes parámetros:

- Tiempo 1 = $T1 = 90$ s
- Tiempo 2 = $T2 = 150$ s
- Presión 1 = $P1 = 1$ atm.
- Presión 2 = $P2 = 2.5$ atm.

- Presión 3 = P3 = 3.5 atm.

Una vez fijado estos valores, en el controlador se obtuvieron los valores mostrados en la figura 4.15:

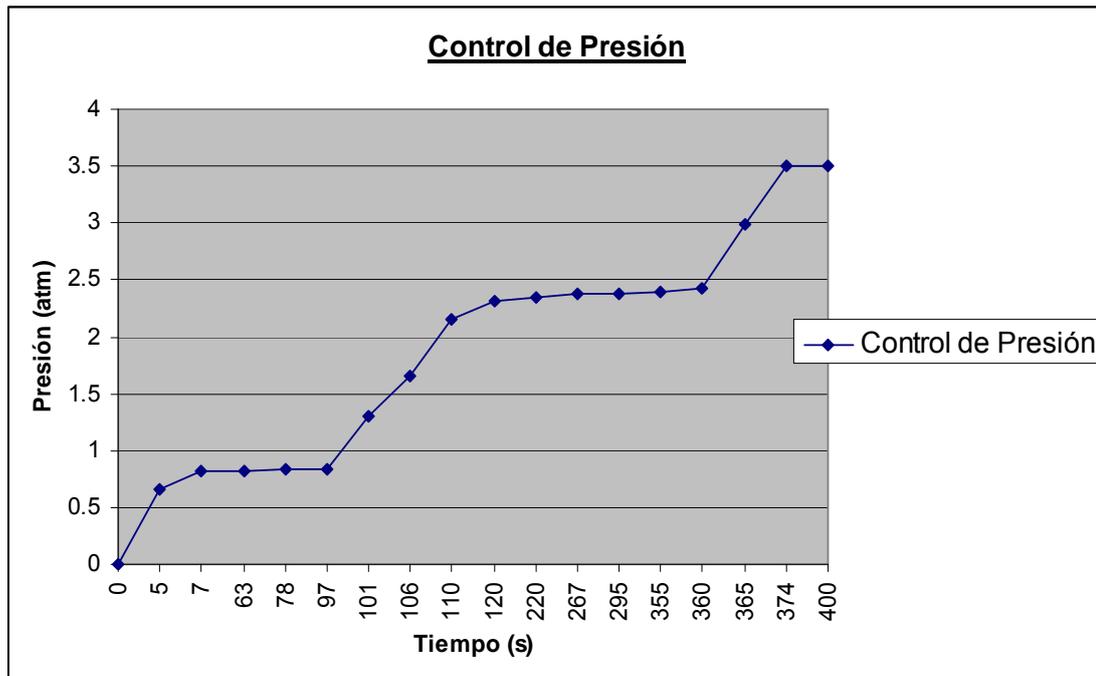


Fig. 4.15 Resultado de control de presión

Antes de controlar la temperatura fue necesario realizar pruebas en vacío, es decir, no se introdujo carga alguna en la autoclave, para así evitar cualquier tipo de daño que se pudiera causar al calzado en caso el control presente errores. Luego de asegurar el perfecto funcionamiento de todas las entradas y salidas digitales y análogas, se procedió a introducir solamente las hormas del calzado, esto para poder simular la transferencia de calor que se produce al momento de realizar la cura del caucho ya que las hormas al ser de metal son las que absorben la mayor cantidad de calor durante el proceso de vulcanización.

Se puede observar en la figura 4.15 que se ha logrado cumplir con el algoritmo planteado para controlar la presión con un error del 0.2 atm, el cual es un rango

que no perjudica al calzado y se logra obtener el caucho vulcanizado sin ningún tipo de deformaciones.

Para lograr la sintonización del PID, se probó el método de la curva de reacción, el cual consiste en abrir el lazo cerrado de regulación antes de encender las resistencias (lazo abierto), en este caso implicaría operar las resistencias calefactores con el controlador seleccionado para trabajar en modo manual. Luego, se crea un pequeño y rápido cambio en escalón en el proceso de entrada. Se debe de obtener una curva de temperatura, la cual una vez estabilizada es analizada de tal forma que se puedan obtener los parámetros necesarios para sintonizar el PID.

Este método fue probado inicialmente con las resistencias encendidas al 100% de su capacidad (caso 1), esperando que la curva de reacción de temperatura se estabilice, pero luego de 50 minutos no se logró obtener una curva de reacción estabilizada, por el contrario se obtenía una pendiente constante tal como muestra la siguiente figura:

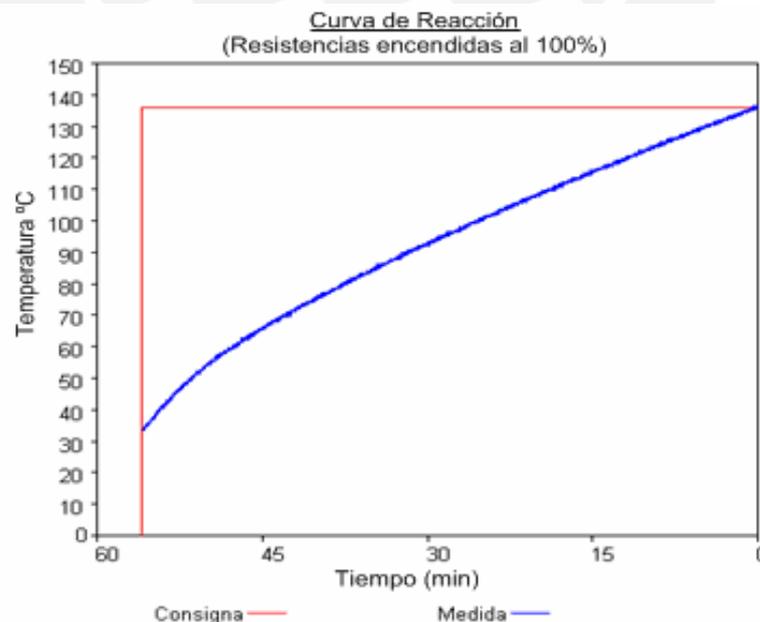


Fig. 4.16 Curva de Reacción de la Temperatura

Un segundo caso fue realizado con las resistencias encendidas al 50 % de su capacidad y un tercer caso con las resistencias encendidas al 25% de su capacidad, pero al igual que el caso 1 no se pudo lograr que la temperatura se estabilice, incluso durante un tiempo de espera de dos horas, lo cual indica que el proceso no es estable en lazo abierto, por lo tanto se decidió descartar el método planteado inicialmente.

Se decidió utilizar el método del tanteo o también llamado prueba y error el cual brinda resultados satisfactorios. El procedimiento se basa en poner en marcha el proceso con la mínima acción en todos los modos e incrementarlas después poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada (véase anexo 13 Resultados del Control de Temperatura).

Luego de realizar una serie de pruebas variando los valores de los parámetros de sintonía del PID se pudo lograr escoger los rangos de valores en los cuales pueden variar estos parámetros:

| Parámetro | Rango |
|-----------|-------------|
| Kp | 0.15 y 0.25 |
| Ti | 0.1 y 0.3 s |
| Td | 0.1 y 1.5 s |

Tabla 4.16 Rango de valores de sintonía (Elaboración propia)

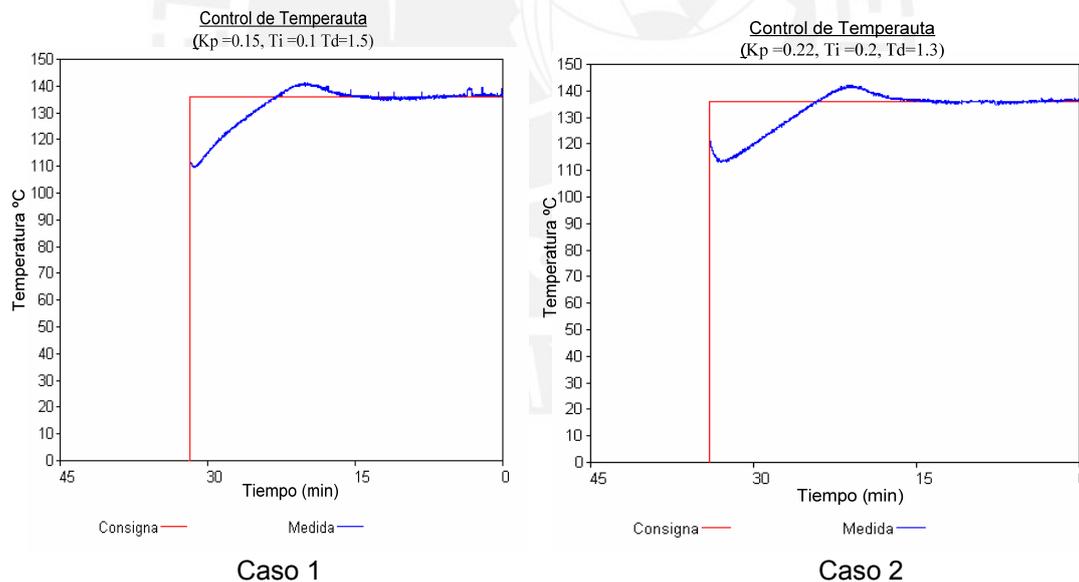
Tomando estos valores se llega a seleccionar tres casos en los cuales el sistema responde de forma deseable:

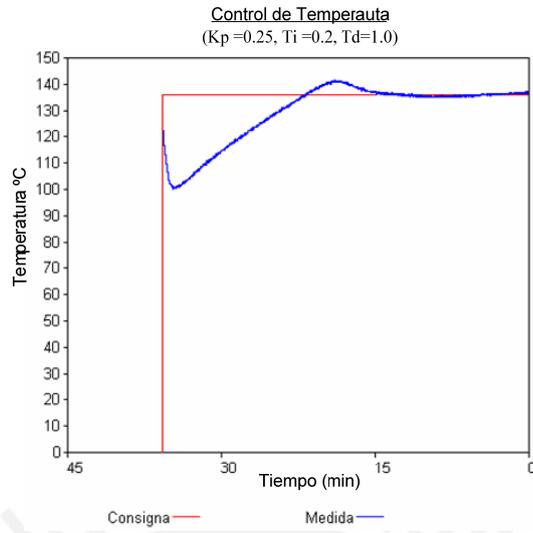
| Caso | Kp | Ti | Td | Tr (min) | Sobreimpulso (°C) | T _{%PO} (min) |
|------|------|-----|-----|-------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | 0.15 | 0.1 | 1.5 | 8.57 | 5.3°C | 6.8 |
| 2 | 0.22 | 0.2 | 1.3 | 9 | 6 °C | 9 |
| 3 | 0.25 | 0.2 | 1.0 | 12.85 | 5.3 °C | 7.28 |

Tabla 4.17 Valores seleccionados para el PID (Elaboración propia)

De estos tres casos, el tercero es descartado debido a que presenta un tiempo de subida mayor a de las dos primeras pruebas. Por lo tanto, bastará en seleccionar entre los dos primeros casos de la Tabla 4.16. Se sabe que el tiempo de trabajo de la máquina es crítico y mientras mayor sea el tiempo durante el cual el caucho se encuentra en la temperatura de vulcanización, mejor será la cura obtenida. Entonces se escoge el primer caso ya que presenta un menor valor en el sobreimpulso y menor tiempo de subida (T_r). Además se ha tomado en consideración el tiempo durante el cual el calzado está expuesto al sobreimpulso, entonces es posible darse cuenta que el segundo caso presenta un diferencial de tiempo de 2.2 min. con respecto al primer caso.

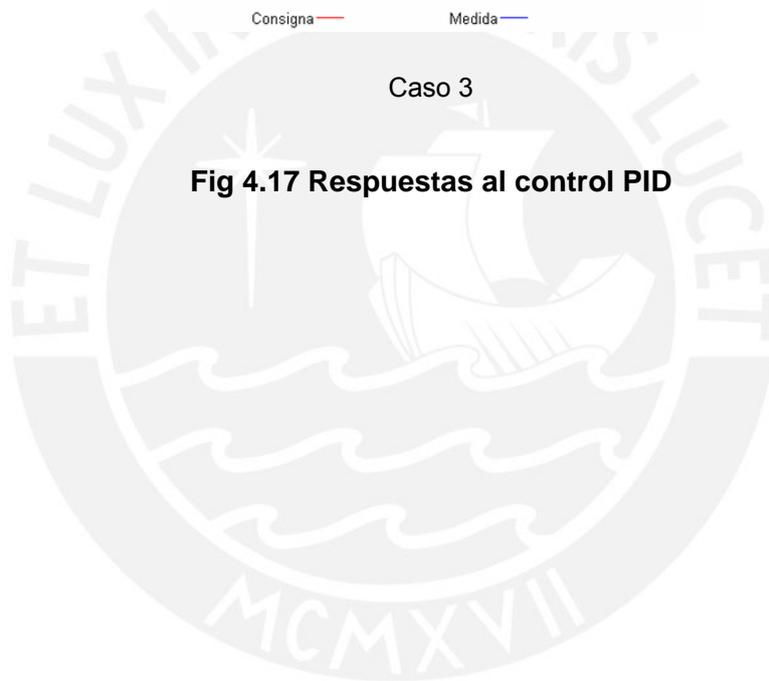
A continuación, en la Fig. 4.17, se presentan las respuestas de los tres casos del control de temperatura:





Caso 3

Fig 4.17 Respuestas al control PID



4.6 Costos de implementación

| Item | Cantidad | Descripción | Precio Unitario \$ | Precio \$ |
|--------------|----------|--|--------------------|----------------|
| 1 | 2 | Electroválvula servoaccionada de 2/2 vías | 105.00 | 210 |
| 2 | 1 | PLC modular telemecanique | 389.00 | 389 |
| 3 | 2 | Extensión de I/O para plc modular | 226.00 | 452 |
| 4 | 1 | Terminal operador de diálogo hombre-máquina (HMI) | 203.00 | 203 |
| 5 | 1 | Transmisor de presión para aplicaciones industriales | 165.00 | 165 |
| 6 | 1 | Sifón de 2 vueltas | 15.00 | 15 |
| 7 | 6 | Relé de estado solido | 30.00 | 180 |
| 8 | 1 | Contactador - motor | 66.20 | 66.20 |
| 9 | 2 | Termomagnético 63 a. | 31.53 | 63.05 |
| 10 | 1 | Termomagnético 32 a. | 15.76 | 15.76 |
| 11 | 1 | Relé térmico | 44.14 | 44.14 |
| 12 | 5 | Relé 24vDC | 1.58 | 7.88 |
| 13 | 40 | Cable siliconado - resistencias | 3.70 | 148 |
| 14 | 8 | Cable trifásico -motor | 4.41 | 35.31 |
| 15 | 1 | Tablero | 47.29 | 47.29 |
| 16 | 31 | Borneras 16MM | 0.38 | 11.73 |
| 17 | 10 | Borneras 8MM | 0.63 | 6.31 |
| 18 | 4 | Llaves selectoras | 12.5 | 50 |
| 19 | 2 | Luminarias | 1.5 | 3 |
| 20 | 2 | Pulsador emergencia | 7.88 | 15.76 |
| TOTAL | | | \$ | 2128.43 |

Precios Locales (Elaboración Propia)

CONCLUSIONES DEL TRABAJO

- 1) Se debe entender que el “tipo de producto” define la cantidad de componentes químicos que se le añaden al caucho y por lo tanto, determinan los valores que pueden tomar los tres parámetros a controlar dentro de la autoclave (temperatura, presión y tiempo) consecuentemente es de suma importancia conocer el rango de valores de estos parámetros, así como las consecuencias que ocasionarían el sobrepasar los límites fijados.
- 2) La variación de la temperatura al interior de la autoclave es un proceso bastante lento en comparación con otros procesos que impliquen la implementación de lazos de control continuos o discretos. Así mismo, la naturaleza de estas “plantas” –en un esquema de control clásico- es del tipo no lineal, hecho demostrado al querer emplear el método de la curva de reacción para lograr sintonizar el PID sin lograr una estabilidad en la señal. Es por esta no linealidad de la planta a controlar que se optó por utilizar un método de sintonía basado en prueba y error.
- 3) La variación de presión al interior de la autoclave es un proceso rápido a comparación de la variación de temperatura. El reemplazo de las tuberías de suministro de aire de 1” por tuberías de ¾” ayudó a un mejor control de la presión reduciendo el caudal y el error en estado estable. Gracias a esto el algoritmo de control de encendido y apagado utilizado para la automatización del control de presión brindó respuestas con un rango de error pequeño de 0.2 atm. el cual es aceptado para el proceso de vulcanización de zapatillas. Como se mencionó anteriormente el tipo de proceso definen el rango de valores en las cuales puede variar nuestros parámetros, en caso se desee vulcanizar otro tipo de producto en la autoclave, antes se debe considerar el porcentaje de error mencionado a fin de que no perjudique la carga.

4) Al incluir una interfaz hombre máquina (HMI) se logró mejorar el control y el monitoreo de la autoclave dando a conocer el estado interno del sistema, entradas y salidas así como la evolución de las señales controladas (temperatura, presión y tiempo). Gracias a esta interfaz es posible detectar fallas y por lo tanto mejorar el sistema. Es posible ampliar la automatización si es que se añaden sistemas SCADA.

5) La automatización de la autoclave ayudó a que el trabajador solo se encargue de cargar y descarga de zapatillas al inicio y al fin del proceso respectivamente, evitando que se emplee su tiempo en cargar o descargar el aire, en fijar el set point de la temperatura y de definir el tiempo de trabajo del horno, ayudando a que el trabajador emplee su tiempo en funciones más productivas para la empresa.

6) Aplicar la herramienta Grafcet ayudó a facilitar el entendimiento del sistema y el desarrollo de una programación estructurada (división del programa por módulos) con la cual es posible realizar pruebas del programa de manera más sencilla, además que facilita a efectuar modificaciones cuando se requieran y es de fácil entendimiento para el técnico encargado del mantenimiento de la máquina.

7) Elaborar un programa abierto, en el cual el trabajador puede fijar tanto los valores de temperatura, presión y tiempo en los cuales debe de trabajar la máquina, es posible emplear esta automatización en otros sistemas que busquen controlar los mismos parámetros como es el caso de una prensa de suelas o autoclaves que trabajen con cargas que no sean zapatillas, teniendo en consideración que los instrumentos de campo no sería el mismo para todos los casos.

RECOMENDACIONES

- 1) Al trabajar con un sistema no lineal para el control de temperatura se recomienda el estudio y la investigación de mecanismos que permitan realizar un modelo de la “planta” con el fin de mejorar el control y manejarlo con una mayor precisión.
- 2) El uso de válvulas solenoides implica un control simple de presión basado en el algoritmo de encendido y apagado que en este caso puede ser empleado para la vulcanización del caucho, pero si por el contrario se busca trabajar con autoclaves las cuales no empleen resistencias para el calentamiento del aire sino trabajan solamente con vapor, como es el caso de la mayoría de autoclaves que vulcanizan llantas, es necesario el reemplazo de estas válvulas por válvulas proporcionales (posicionadores lineales) y la creación de un algoritmo de control con buena precisión.
- 3) Al emplear dos termocuplas situadas en distintos puntos de la autoclave es posible monitorear que el aire circulante alrededor del calzado es uniforme. Se propone el estudio del control de la temperatura del caucho con la ayuda de termopares que se introduzcan en la suela a fin de poder optimizar el control tal como lo realiza la empresa Anziani.
- 4) Se propone el estudio de una interfaz actuador-sensor (AS Interface) como alternativa de automatización al cableado típico (cableado paralelo) empleado al trabajar con instrumentos y actuadores electrónicos (cables de alimentación y señales para cada equipo). Logrando así una conexión de los equipos en forma ramificada y reduciendo el hardware empleado para la automatización (cables, tamaño del tableo, módulos extra para el PLC).

10. FUENTES

- [1] The American Society of Mechanical Engineers
[Consultado 2005/09/13]
www.asme.org
- [2] Empresa de calzado Industrial Cóndor SAC.
Hoja de datos de autoclave. [Consultado 2005/09/16]
<www.idlcondor.com>
- [3] ASHLEY, Michael
1995 Autoclave artificial intelligence [en línea] New York : Mechanical Engineering Jun [Consultado 2005/09/10] Tomo117, N° 6; pg. 38
<<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=6804496&sid=2&Fmt=3&clientId=39490&RQT=309&VName=PQD>>
- [4] Anonimo
2005 Ethernet I/O comes to industrial autoclaves [En línea]. Tomo77, N° 2; pg. 25, 1 pgs Machine Design. Cleveland Junio [Consultado 2005/09/14]
<<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=785051241&Fmt=4&clientId=39490&RQT=309&VName=PQD>>
- [5] SALAZAR, Pablo
2004 Protocolo para la conducción de estudios de distribución de calor para procesar en autoclaves estáticas, por inmersión en agua, incluyendo sistemas de agitación operando en modo estático. Guayaquil. [Consultado 2005/09/13]
- [6] Businessline
1998 Nal builds biggest autoclave for Hindustan Aeronautic [En línea] Chennai (India). Asia Intelligence Wire from FT Information . [Consultado 2005/09/20]
<<http://proquest.umi.com/pqdweb?did=32619777&sid=1&Fmt=3&clientId=39490&RQT=309&VName=PQD>>
- [7] University of Ottawa
2003 A guideline for the safe use of autoclaves [En línea] Environmental Health and Safety Service.[Consultado 2005/09/20]
<http://www.uottawa.ca/services/ehss/autoclave.pdf>.

- [8] U. Giese
1999 Sampling and Analysis of Emissions in the Rubber Industry [En línea] German Institute for Rubber Technology DIK-Publikation 115, Manchester.[Consultado 2005/10/05]
<http://www.dikautschuk.de/angebot/doku/publi/115.pdf>
- [9] Investigan el uso del microondas para mejorar la calidad del calzado
1999 Valencia. [Consultado 2006/01/05]
<<http://prensa.upv.es/dir/prensa/recull/ver//todo/199909?0620134457a27285>>
- [10] FRIEDENTHAL, Esteban
2003 Seminario sobre el Desarrollo de Cauchos Especiales Conte- Lima [Consultado 2006/01/15]
- [11] NHT Autoclave Control New Hydraulic Technology Pump Control [Consultado 2006/01/17]
<www.nht.com/pump300e.htm>
- [12] FGH Controls Limited
Thermal Heat Ratio [Consultado 2006/02/07]

http://www.fgh.co.uk/thermal_head_ratio.htm
- [13] McGill AirPressure Autoclave Control System
MAAC 200 Control Systems. [Consultado 2006/02/07]
<http://www.mcgillairpressure.com/autoclave_site/textdocs/control_s/controls_intro.html>
- [14] ABB-Industrial Enable
Autoclave using a C 360. [Consultado 2006/02/24]
<[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT203.nsf/VerityDisplay/F782FDE67C9AB86480256E2E0038274E/\\$File/AG_RCP-003_2.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/SCOT203.nsf/VerityDisplay/F782FDE67C9AB86480256E2E0038274E/$File/AG_RCP-003_2.pdf)>

- [15] Prodigy
Autoclave Control and Process Monitorin.
[Consultado 2006/02/07]
<<http://www.tascomp.com/index.php/article/articleview/22/1/46/>>
- [16] Walton process Technologies
PCS Control Software
<http://www.autoclaves.com/ControlSoftware.htm>
- [17] Tescom Europe
ER 3000 Series – Controlador Electrónico de Presión
<http://www.tescom-europe.com>
- [18] Anzani Spa
Vulcomatic, Machines for footwear, leather goods, garments.
<http://www.anzanispa.it>
- [19] Santa Fe Rubber
[en línea]. [consultado 2006/10/14]
<http://santaferubber.com/>
- [20] CARRANZA, Raymundo
2001 Automatización: Tópicos de Instrumentación y Control
Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [21] NAUNTON, W.J.S
1967 Ciencia y Tecnología del Caucho [Consultado 2006/11/07]
Mexico:CECSA.
- [22] OGATA, Katsuhiko
2003 Ingeniería de Control Moderna 4a ed.
Madrid: Pearson Educación
- [23] MALONEY, Timothy J.
1983 Electrónica Industrial moderna

- [24] Rubber Manufacturers association
<<http://www.rma.org/>>
- [25] Chemistry, Technology & Conservation
<http://www.bouncing-balls.com/chemistry_tech_conservation/vulcanization.htm>
- [26] CARDILLO, Marco Antonio
1995 Nuevas Tecnologías en la industria del Caucho [revista] **Lima** :
Ingeniería Industrial [Consultado 2006/03/28] Año , N° 16; pg. 61-
72
- [27] Good Practice Guide Series
1994 Rubber moulding and curing in the rubber processing industry
[revista]
- [28] Intellicom innovation
Modbus Protocol [en línea]. [consultado 2006/10/14]
<<http://www.intellicom.se/modbus.shtml>>
- [29] Modicon
Modbus Protocol [en línea]. [consultado 2006/10/15]
<<http://www.modicon.com/techpubs/intr7.html>>
- [30] JIMÉNEZ, Emilio
Implementación de las automatizaciones en los dispositivos
industriales de control automático. Universidad de La Rioja [en
línea]. [Consultado 2006/12/11]
<http://www.artist2.upv.es/actividades/jornadas/XXIII/documentos/ja02_041.pdf>
- [31] Danfoss Industrial Controls
Industrial Control. Medium and Ambient Temperature Influence
on Pressure Transmitter MBS33. [en línea]. [consultado
2006/12/12]
<<http://us.ic.danfoss.com/TechnicalInfo/>>

- [32] Omega
SSR Thermal Considerations [en línea]. [consultado 2006/12/12]
<www.omega.com>
- [33] FLORES T., Antonio
2002 Control en Cascada. Universidad Iberoamericana-Santa Fe.
- [34] JIMÉNEZ MACIAS, Emilio
2004 Técnicas de Automatización avanzadas en procesos industriales.
Tesis Doctoral. Universidad de La Rioja. España 310p.
[consultado 2007/01/02]
- [35] GAERTNER Nathalie y THIRION , Bernard
Grafcet: an Analysis Pattern for Event Driven Real-time Systems
Laboratoire EEA, Groupe LSI Université de Haute-Alsace, France.
[consultado 2007/02/10]
- [36] RASHID, Muhammad H.
1995 Electronica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones. 2a
ed. Naucalpan de Juárez (Mexico): Prentice Hall
Hispanoamericana
- [37] CHAPMAN, Stephen J.
2000 Máquinas Eléctricas 3a ed.
Santa Fé de Bogota: McGraw-Hill Interamericana SA
- [38] M. JUMA y M. BAFRNEC
2003 Experimental Determination of Rubber Curing Reaction Heat
Using the Transient Heat Conduction Equation
Department of Chemical and Biochemical Engineering, Faculty of
Chemical and Food Technology. Slovak University of Technology
- [39] PINHEIRO, Eduardo
2001 Modelos Numéricos aplicados a vulcanización de llantas.
Tesis Magíster en Ingeniería. Escuela Politécnica de la
Universidad de Sao Paulo. Brasil 125p
- [40] SCHNEIDER Electric

- 2006 Telemecanique. Controladores programables Twido. Guía de referencia de hardware V3.2.
- [41] SCHNEIDER Electric
2006 Telemecanique. Controladores programables Twido. Guía de referencia del software V3.2
- [42] Diagramas de Proceso Instrumentación
2005 Piping and Instrumentation Diagram [en línea]. [consultado 2007/10/01] <<http://www.engineeringtoolbox.com/>>
- [43] ARIAN
2003 Industrial Control & Instrumentation. Como sintonizar un control PID, teoría y práctica. [en línea]. [consultado 2007/08/02] <www.arian.cl/downloads/nt-011.pdf>
- [44] RIOJA, Jorge L.
2006 Diseño de un sistema electrónico modular para el control de humedad relativa en los espacios de exhibición de un museo. Tesis. Pontificia Universidad Católica del Perú. 100p. [consultado 2007/10/02]
- [45] ALARCÓN CARTAGENA, Ricardo
1999 Diseño y fabricación de un módulo de control automático de preparación de mezclas usando la combinación PLC-Software de supervisión de procesos. Tesis. Pontificia Universidad Católica del Perú. 100 p.
- [46] LOADMAN, M. J. R
1998 Analysis of rubber and rubber-like polymers
Dordrecht : Kluwer Academic
- [47] OHM, Robert F.
1990 The Vanderbilt Rubber Handbook 13a. ed.
Norwalk: R.T Vanderbilt Company, Inc. Industrial Minerals and Chemicals
- [50] FAIRCHILD Semiconductor
2006 LM7824 LINEAR INTEGRATED CIRCUIT. 3-TERMINAL 1A POSITIVE VOLTAGE REGULATOR. [En línea]. [Consultado 2006/10/02] <<http://doc.chipfind.ru/fairchild/lm7824a.htm>>

- [51] BUITRAGO, John Byron y HERNÁNDEZ, Hernán Darío
Sistema basado en plc para control, monitoreo y almacenamiento de datos de temperatura de un colector solar paraboloide compuesto. [En línea]. [Consultado 2007/10/05]
<http://electronica.udea.edu.co/academicos/proyectos/control/Hernan_Byron/paper_colector_solar.pdf>
- [52] BETANCOR C., CEREZO J. y VEGA, A.
Diseño de un sistema de control de temperatura. Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada (IUMA), Universidad de Las Palmas de G.C. . [En línea]. [Consultado 2007/10/05]
<www.euitt.upm.es/taee06/papers/S9/p77.pdf>
- [53] TECSUP
2006 Laboratorio de Instrumentación y Control Industrial
Programa de Especialización. Lima
- [54] TECSUP
2007 Integración de Sistemas Industriales con PLC
Programa de Capacitación Continua. Lima
- [55] TECSUP
2007 Control de Procesos Avanzados
Programa de Capacitación Continua. Lima
- [56] JIMENEZ BUENDIA, Manuel
Comunicaciones Industriales. Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Tecnología Electrónica. Protocolo Modbus Tema 7. Pg. 1 – 10
http://www.dte.upct.es/personal/manuel.jimenez/docencia/GD6_Comunic_Ind/pdfs/Tema%207.pdf

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Facultad de Ciencias e Ingeniería



**Automatización del sistema de control y monitoreo de
una autoclave para el proceso de vulcanización del
caucho en calzado de lona**

ANEXOS

Presentado por:
Javier Eduardo Reyes Sánchez

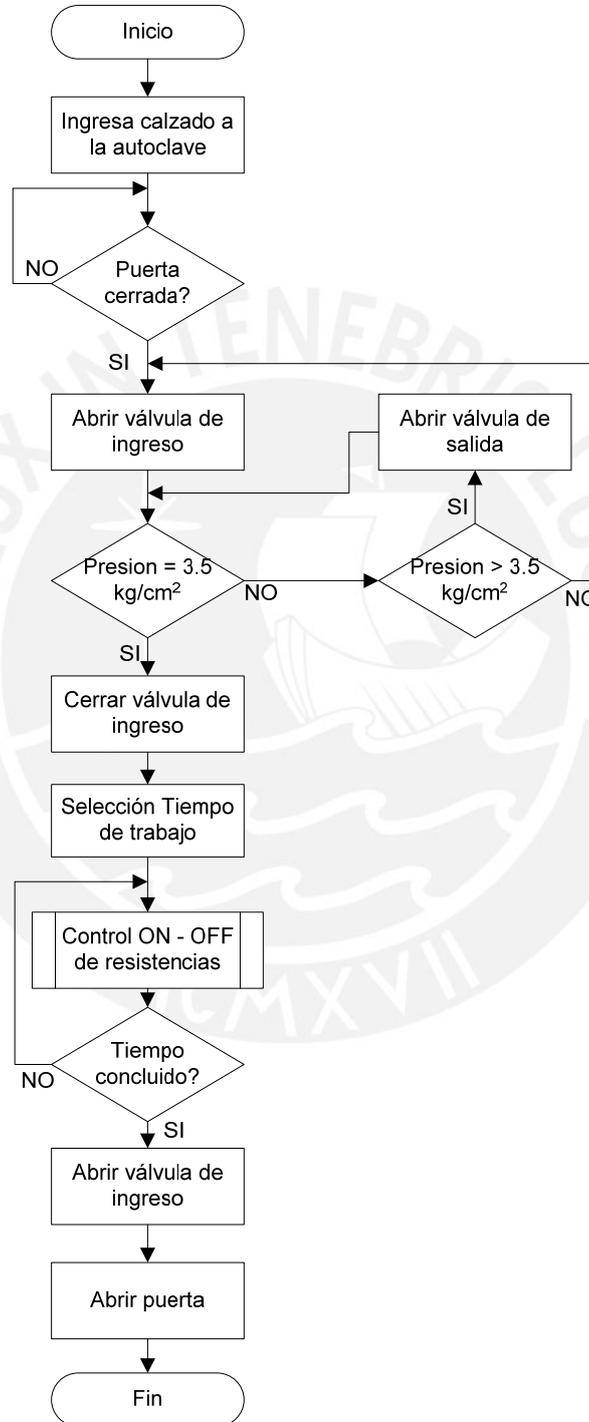
Lima - PERÚ
2008

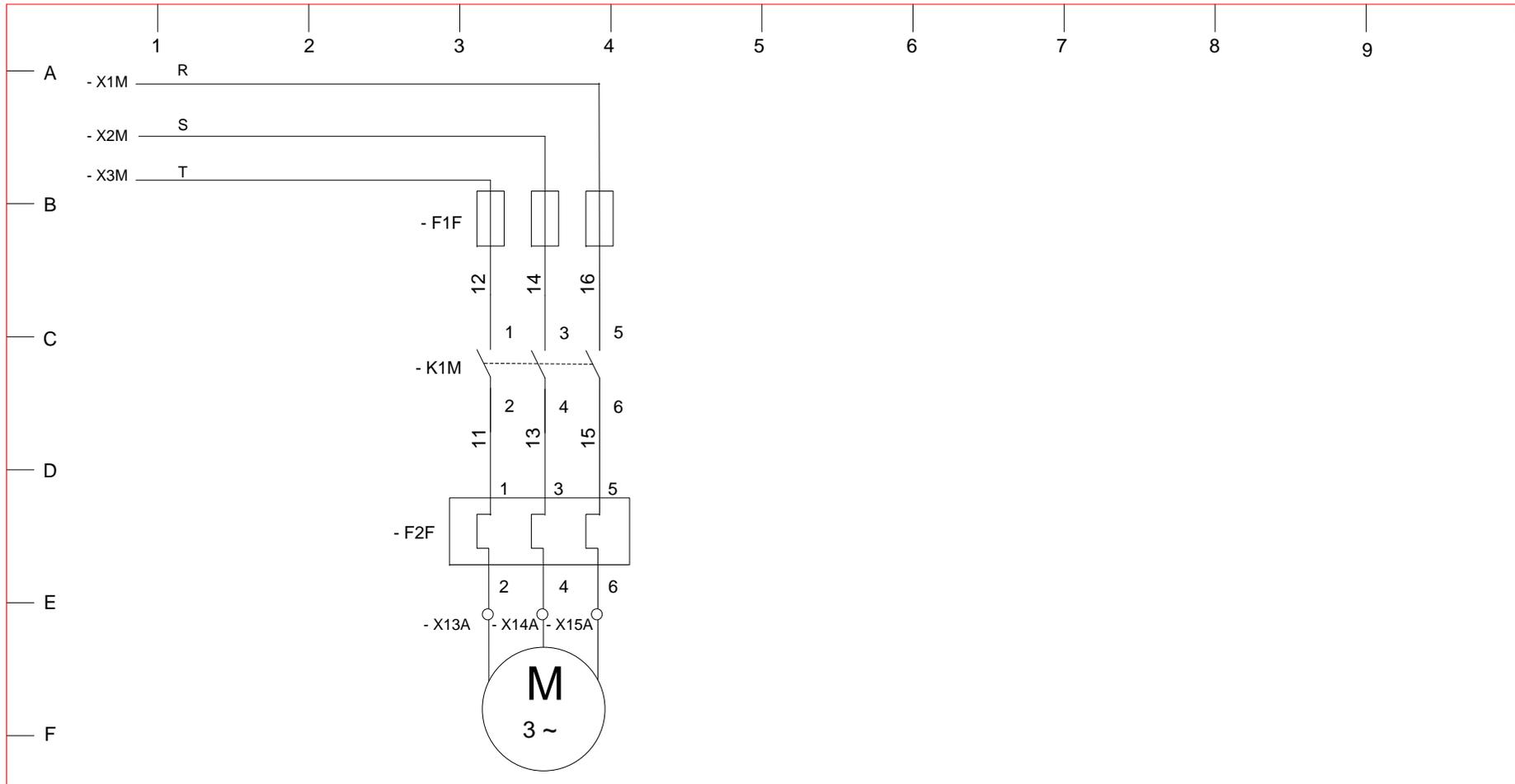
ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1: DIAGRAMA DE FLUJO – PROCEDIMIENTO EMPLEADO
- ANEXO 2: CIRCUITOS ELECTRICOS
- ANEXO 2.1: ARRANQUE DIRECTO DEL MOTOR VENTILADOR
- ANEXO 2.2: ALIMENTACION GENERAL PARA RESISTENCIAS ELECTRICAS
- ANEXO 2.3: CONTROL DE RESISTENCIAS CALEFACTORAS GRUPO 1
- ANEXO 2.4: CONTROL DE RESISTENCIAS CALEFACTORAS GRUPO 2
- ANEXO 2.5: CONTROL DE ACTUADORES E INDICADORES
- ANEXO 3: PLC TWIDO MODULAR
- ANEXO 3.1: SALIDAS DE RELE EN MODULO TWDLM20DRT
- ANEXO 3.2: SALIDAS DIGITALES PWM PARA CONTROL DE SSR
- ANEXO 3.3: ENTRADAS DIGITALES EN MODULO TWDLMDA20DRT
- ANEXO 3.4: MODULO ANALÓGICO – TERMOCUPLAS TIPO J
- ANEXO 3.5: MODULO ANALOGICO – TRANSDUCTOR DE PRESION
- ANEXO 4: ESQUEMA DE BORNERAS
- ANEXO 4.1: BORNERAS COMUNES 24VDC
- ANEXO 5: DIAGRAMA DE INSTRUMENTACION
- ANEXO 6: DIAGRAMA DE FLUJO PROGRAMA PRINCIPAL
- ANEXO 7: DIAGRAMA DE FLUJO AUTOMATIZACION DE PRESION
- ANEXO 8: DIAGRAMA DE FLUJO AUTOMATIZACION DE TIEMPOS
- ANEXO 9: GRAFCET PROGRAMA PRINCIPAL
- ANEXO 10: GRAFCET AUTOMATIZACION DE PRESION
- ANEXO 11: PANTALLAS DEL HMI
- ANEXO 12: RESULTADOS CONTROL DE PRESION
- ANEXO 13: RESULTADOS CONTROL DE TEMPERATUARA
- ANEXO 14: RESULTADOS CONTROL ON - OFF
- ANEXO 15: TABLA DE TIEMPOS DE TRABAJO
- ANEXO 16: FOTOS – AUTOMATIZACION DE AUTOCLAVE

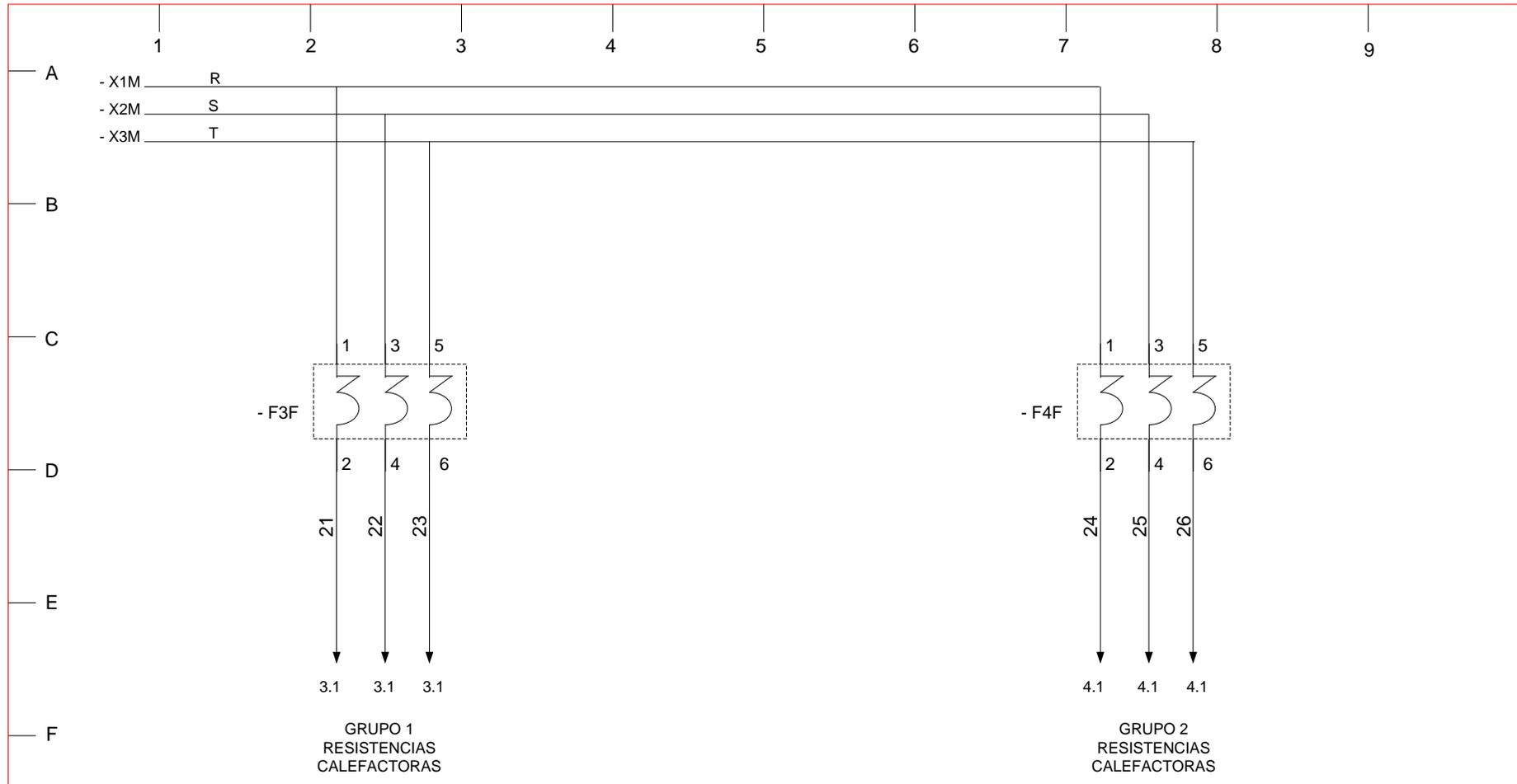
ANEXO 1:

DIAGRAMA DE FLUJO – PROCEDIMIENTO EMPLEADO

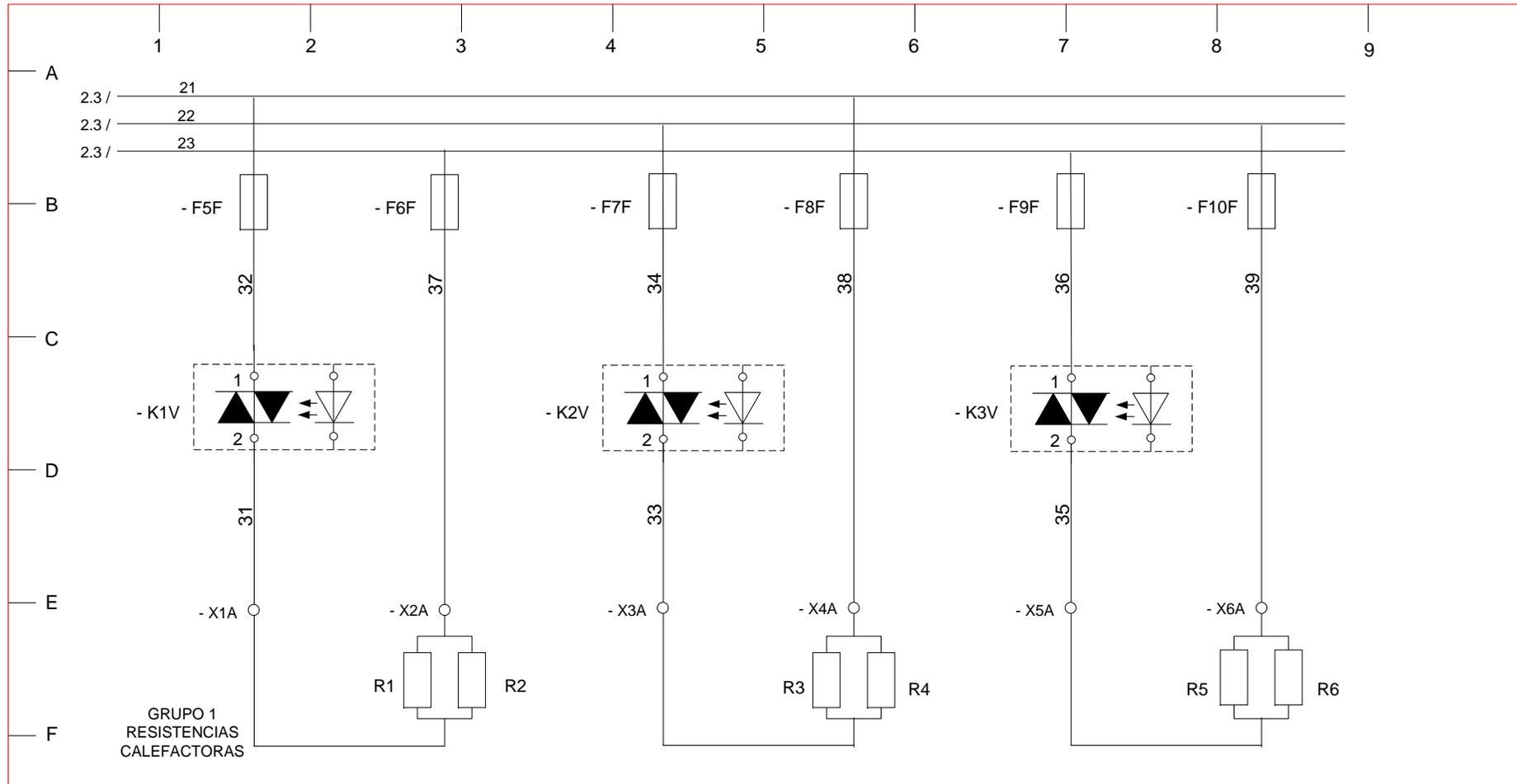




| | | | | | |
|---|---------------|--------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 2.1 ARRANQUE DIRECTO DE MOTOR VENTILADOR | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA Nº: 1 | HOJA Nº: 1 | Nº DE HOJAS: 13 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |



| | | | | | |
|---|----------------------|---------------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO2.2. ALIMENTACIÓN GENERAL PARA RESISTENCIAS CALEFACTORAS - ANEXO 2.2 | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA Nº: 2 | HOJA Nº: 2 | Nº DE HOJAS: 13 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |



DENOMINACIÓN: ANEXO 2.3
CONTROL DE RESISTENCIAS CALEFACTORAS GRUPO 1

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA
 DEL PERÚ**



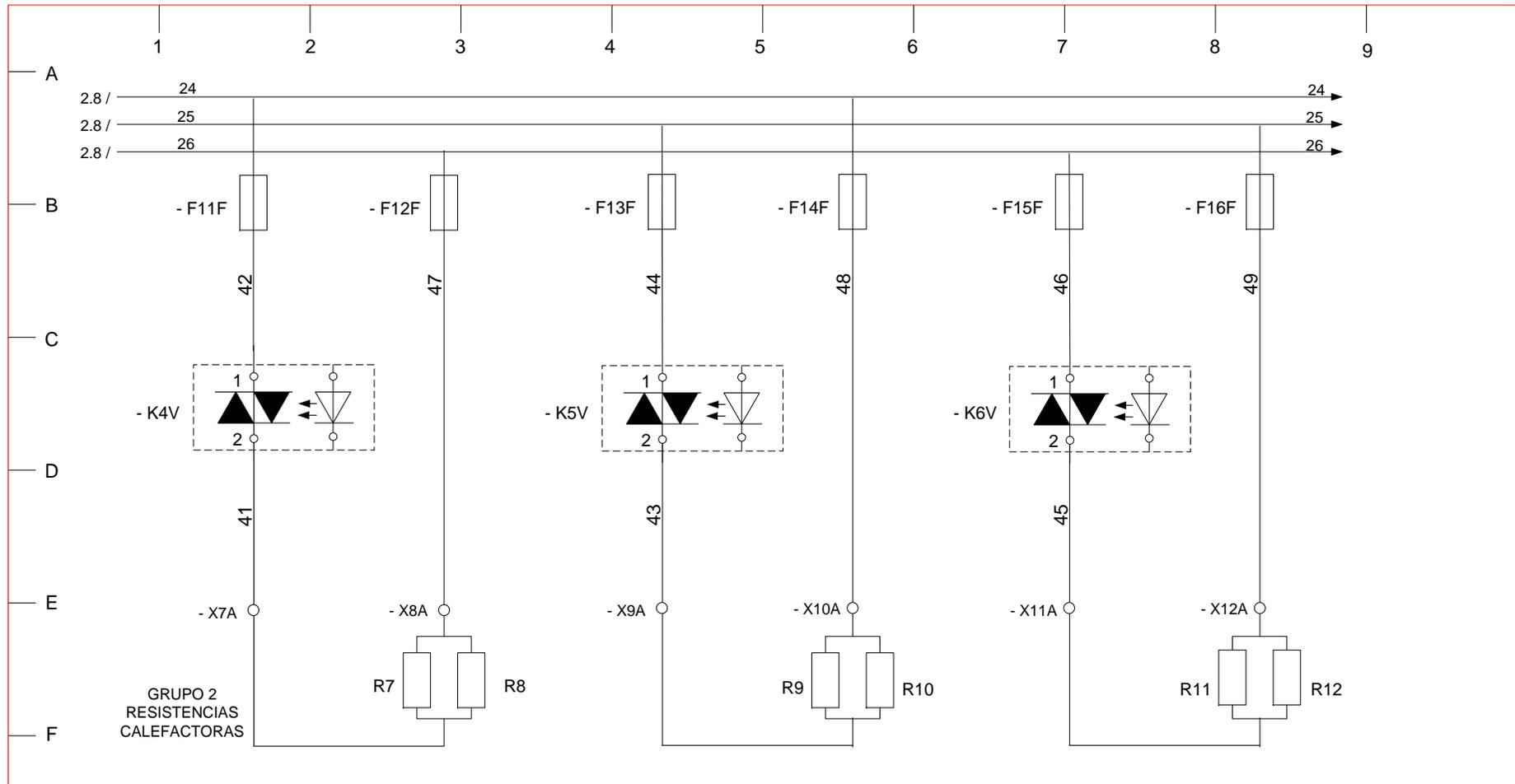
| | | |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| ESQUEMA Nº: 3 | HOJA Nº: 3 | Nº DE HOJAS: 13 |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|

DIBUJADO POR: **J.E.R.S**

ESCALA: **S/E**

FECHA:

REVISADO POR: **L.A.O.S**



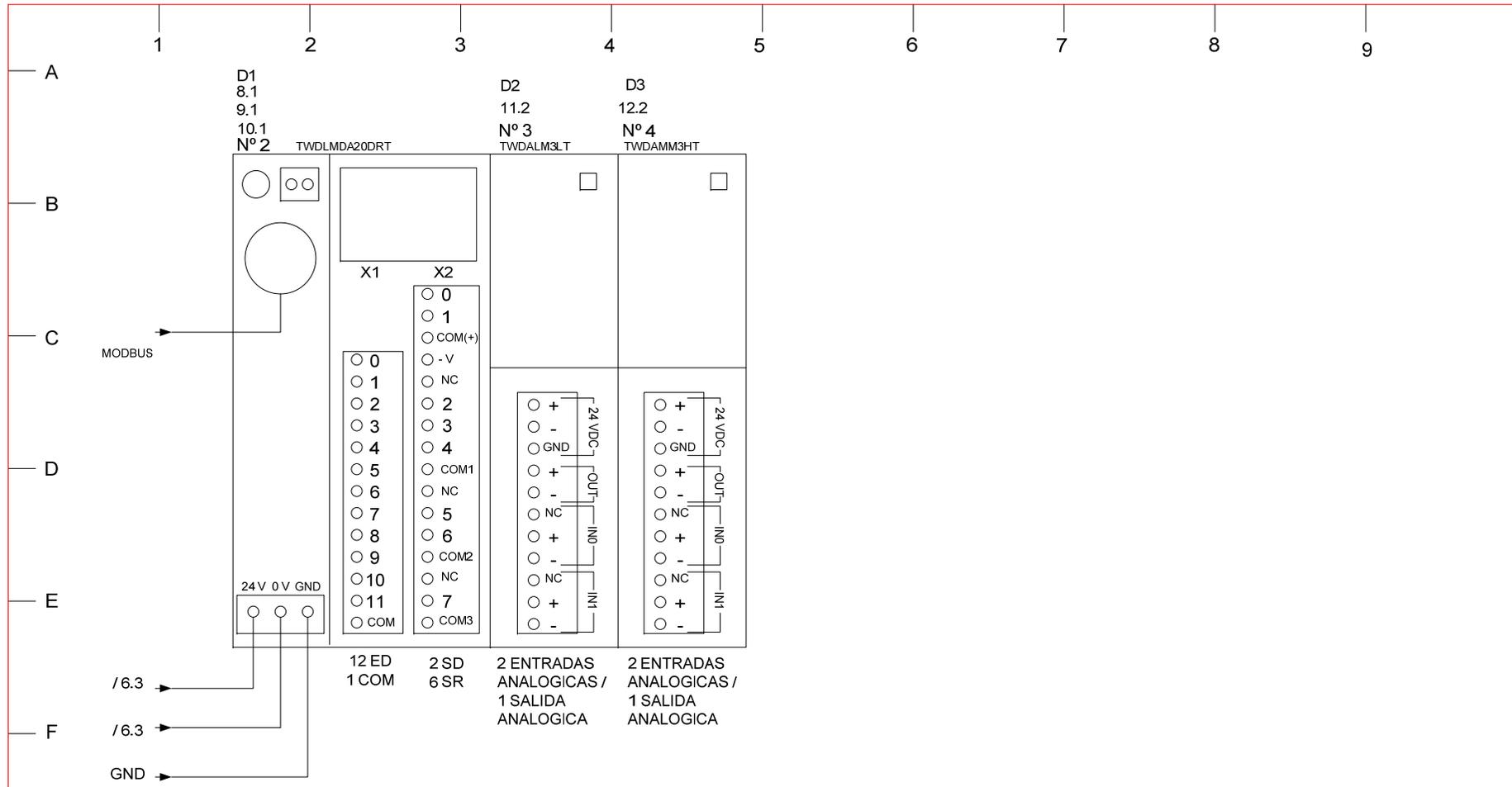
DENOMINACIÓN: ANEXO 2.4
CONTROL DE RESISTENCIAS CALEFACTORAS GRUPO 2

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA
 DEL PERÚ**



| | | |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| ESQUEMA N°: 4 | HOJA N°: 4 | N° DE HOJAS: 13 |
| ESCALA: S/E | FECHA: | |

| |
|---------------------------------|
| DIBUJADO POR: J.E.R.S |
| REVISADO POR: L.A.O.S |



DENOMINACIÓN: ANEXO 3

PLC TWIDO MODULAR

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA
DEL PERÚ

ESQUEMA N°:

6

HOJA N°:

6

N° DE HOJAS:

13

DIBUJADO POR:

J.E.R.S

ESCALA:

S/E

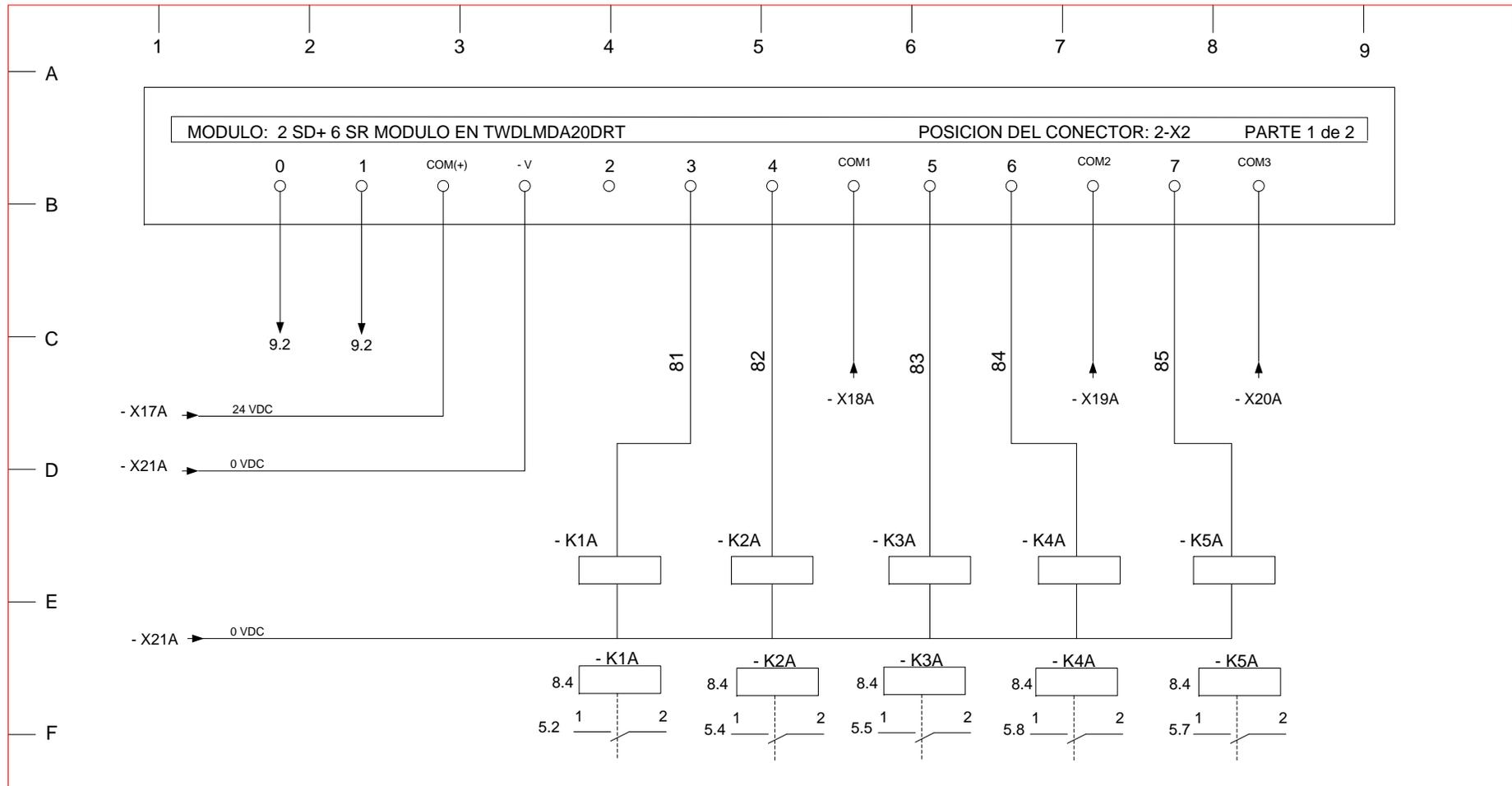
FECHA:

REVISADO POR:

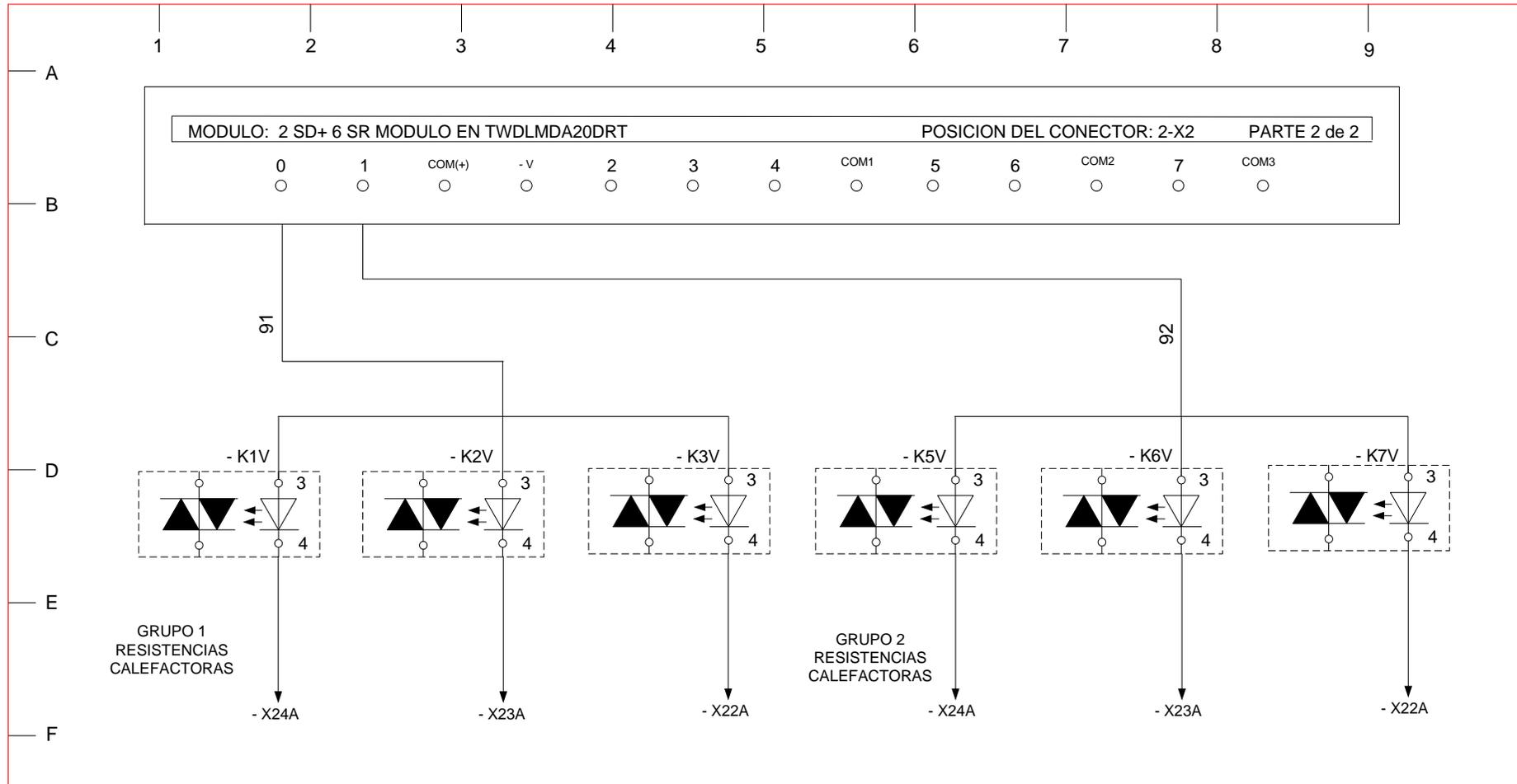
L.A.O.S



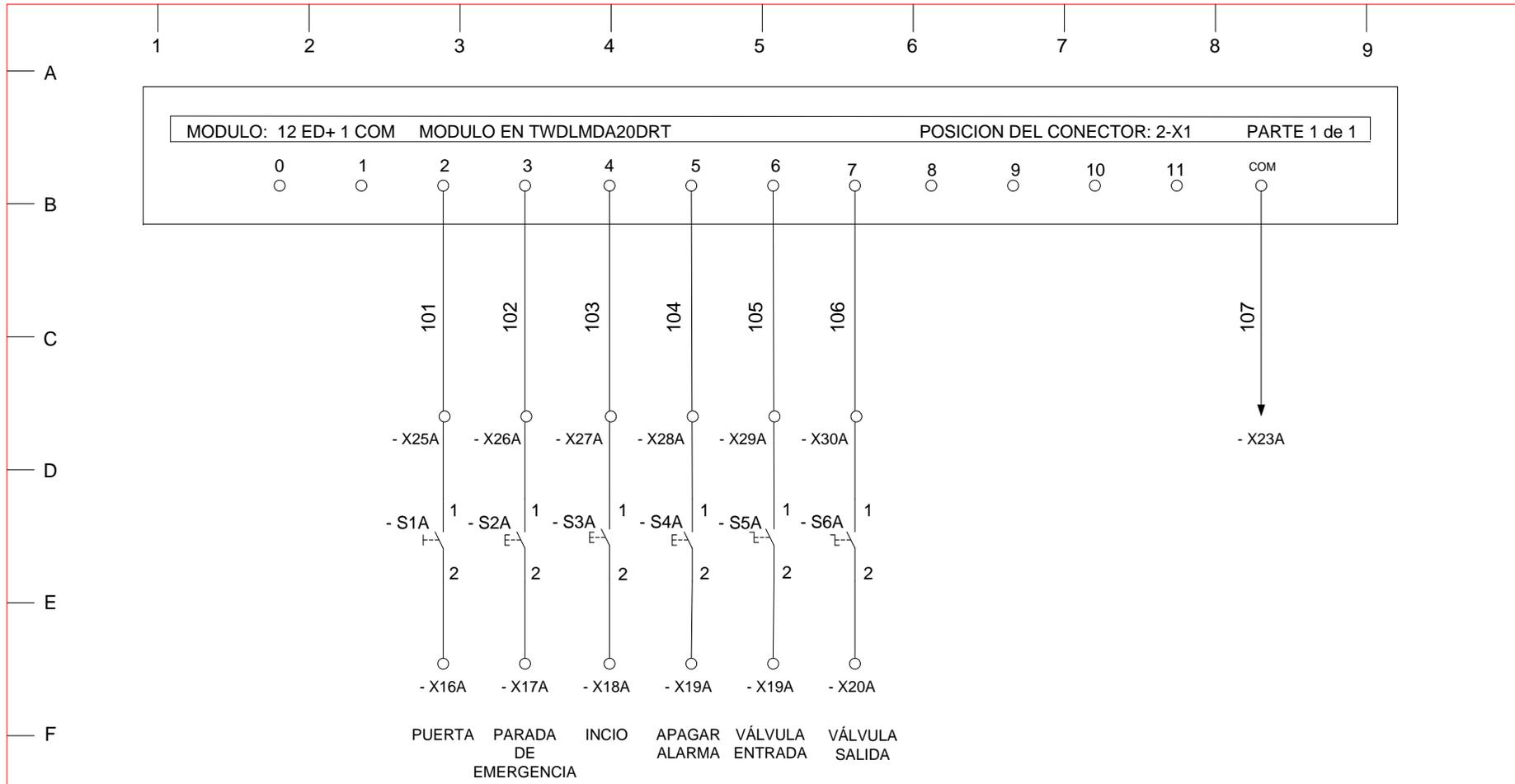
INDUSTRIAL CONDOR S.A.C.



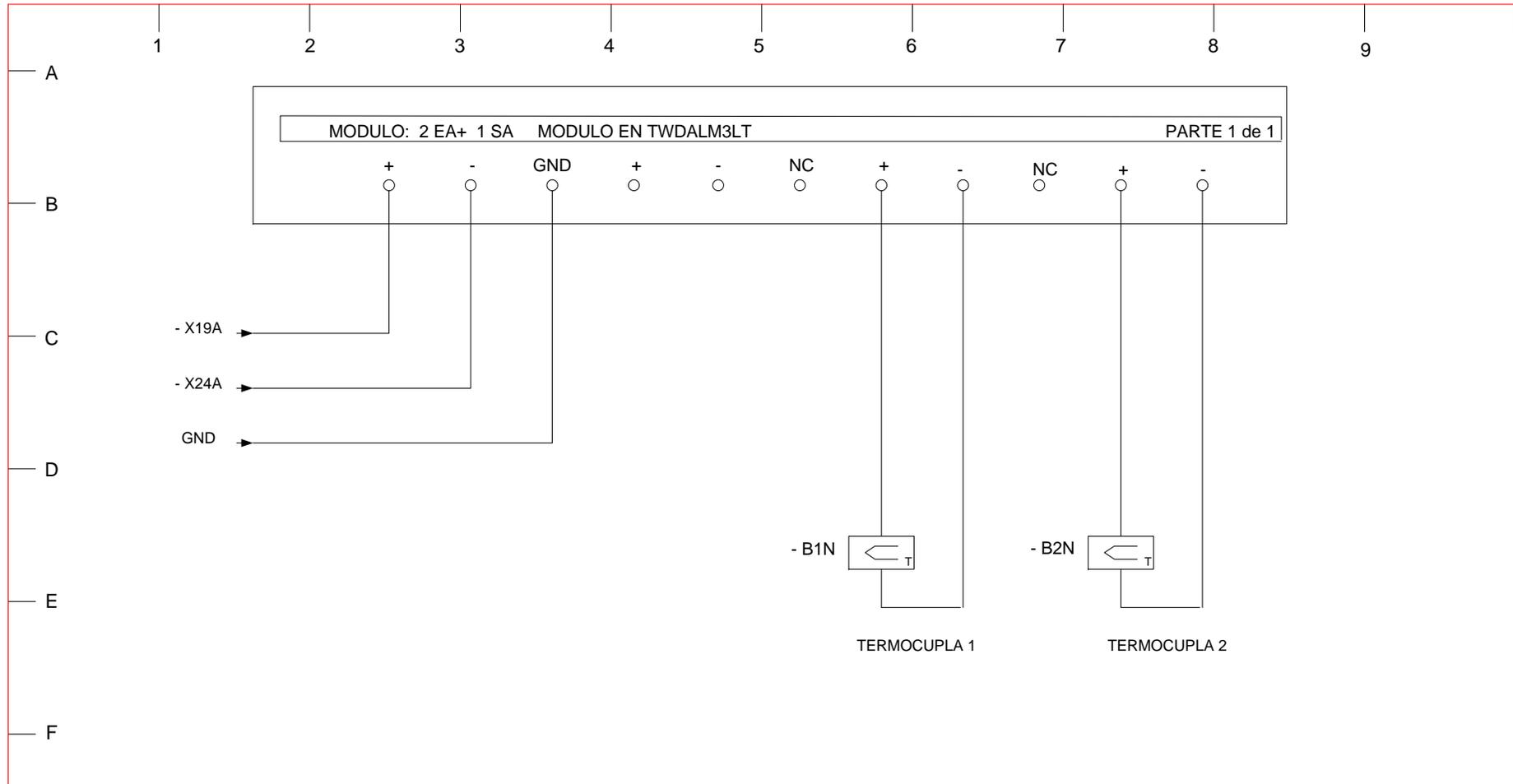
| | | | | | |
|---|----------------------|---------------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 3.1 PLC TWIDO SALIDAS DE RELÉ EN MODULO TWDLMDA20DRT | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA N°: 7 | HOJA N°: 7 | N° DE HOJAS: 13 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |



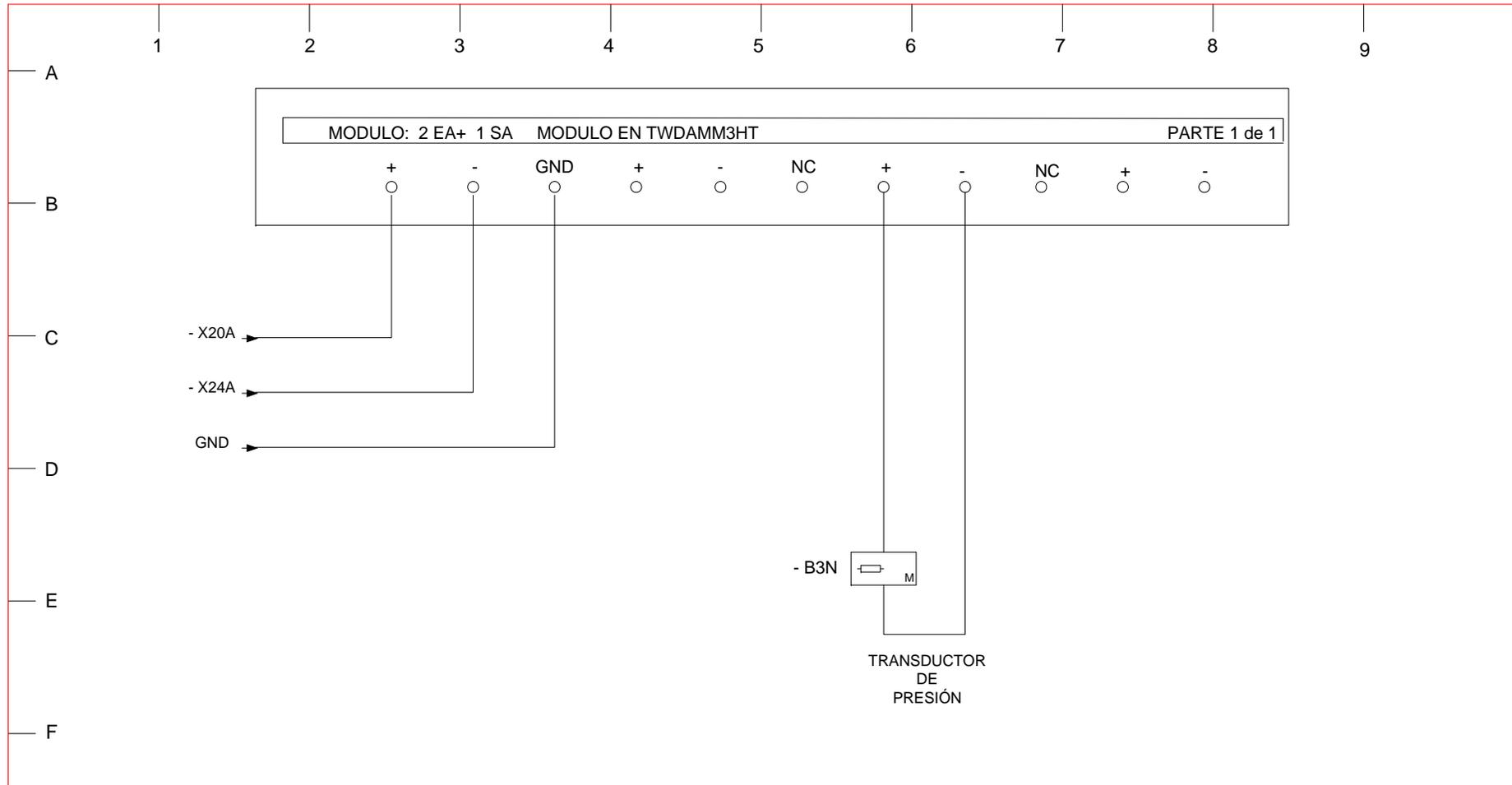
| | | | | | |
|--|---------------|--------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 3.2 PLC TWIDO SALIDAS DIGITALES PWM CONTROL DE SSR | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA Nº: 8 | HOJA Nº: 8 | Nº DE HOJAS: 13 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |



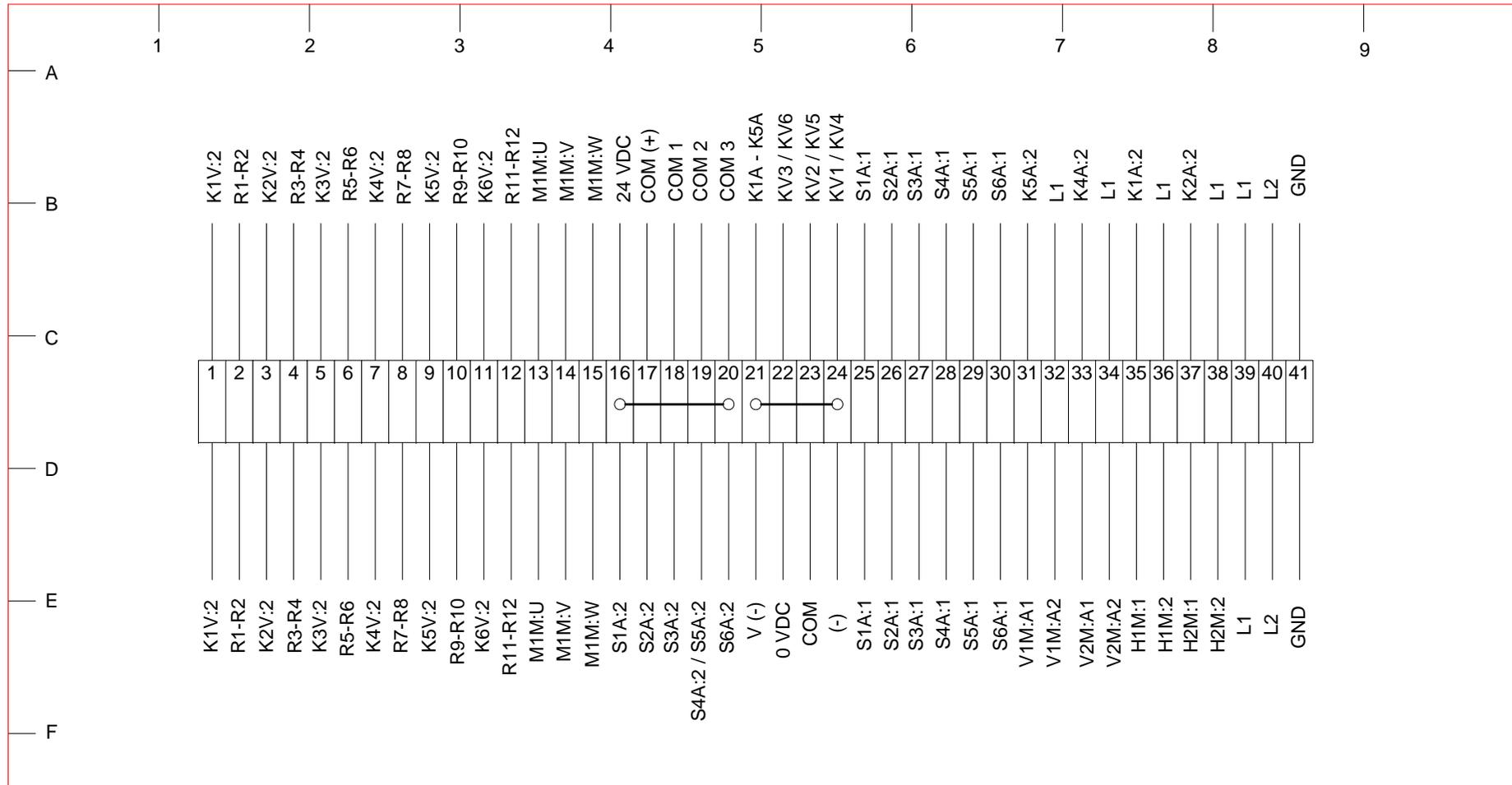
| | | | | | |
|---|---------------|--------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 3.3 PLC TWIDO ENTRADAS DIGITALES EN EL MODULO TWDLMDA20DRT | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA Nº: 9 | HOJA Nº: 9 | Nº DE HOJAS: 13 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |



| | | | | | |
|--|----------------|--------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 3.4 PLC TWIDO MODULO ANALÓGICO - TERMOCUPLAS TIPO J | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA Nº: 10 | HOJA Nº: 10 | Nº DE HOJAS: 13 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |

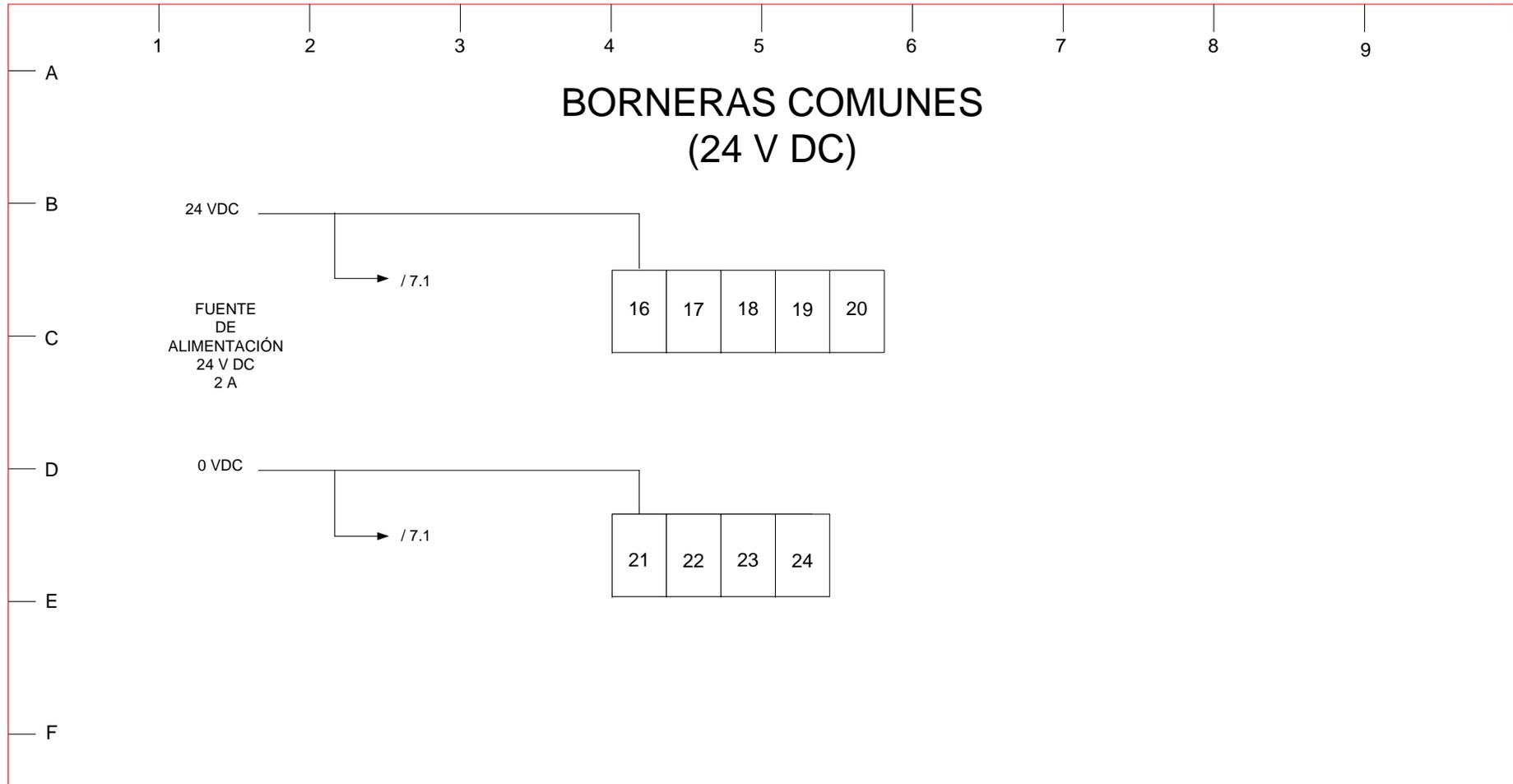


| | | | | | |
|--|----------------|--------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 3.5 PLC TWIDO MÓDULO ANALÓGICO - TRANSDUCTOR DE PRESION | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA Nº: 11 | HOJA Nº: 11 | Nº DE HOJAS: 13 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |

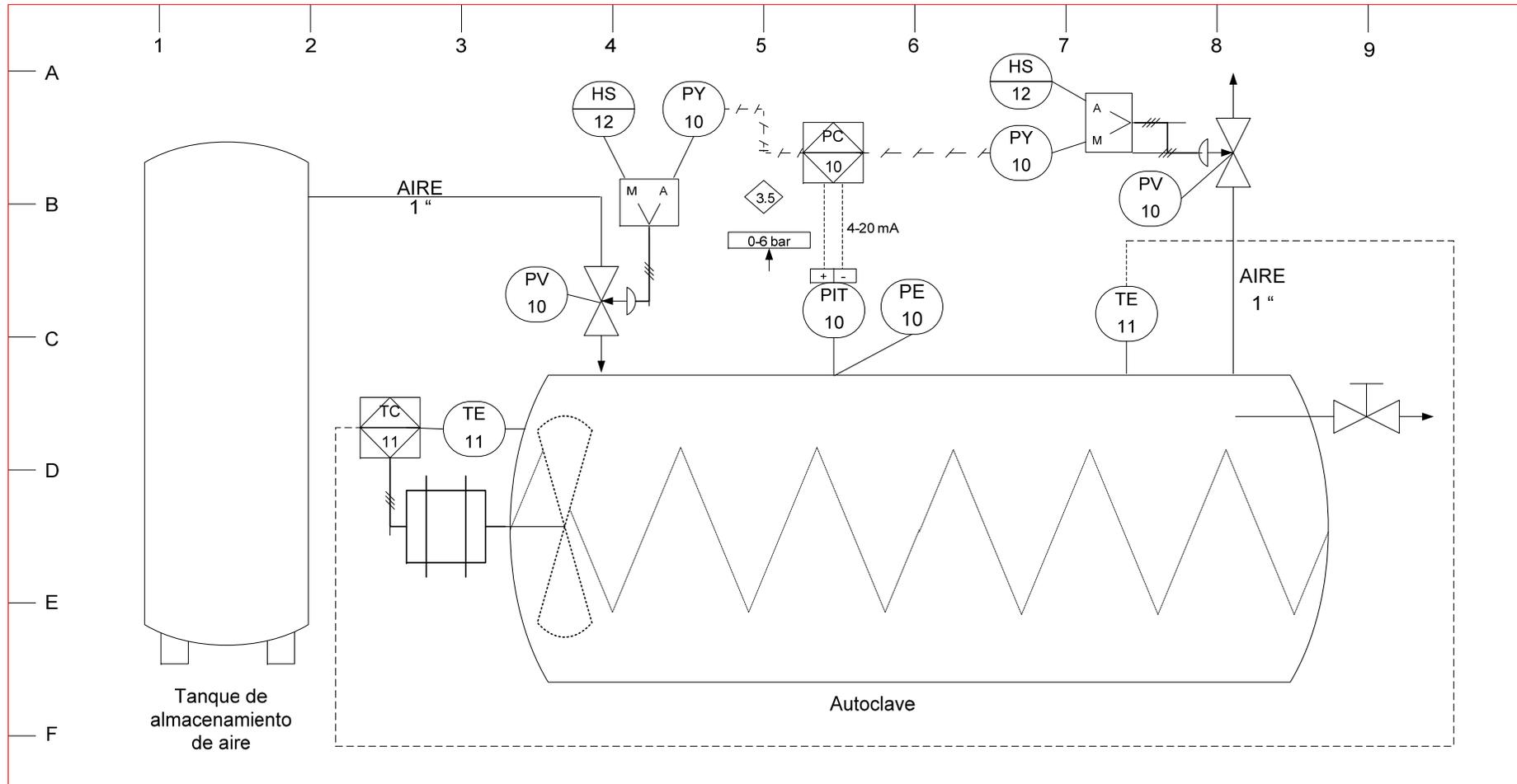


| | | | | | |
|-----------------------|----------|--------------|---|---------|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 4 | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA DE BORNERAS | | | | | |
| ESQUEMA Nº: | HOJA Nº: | Nº DE HOJAS: | DIBUJADO POR: | J.E.R.S | |
| ESCALA: | FECHA: | | REVISADO POR: | L.A.O.S | |
| 13 | 13 | 13 | | | |
| S/E | | | | | |

BORNERAS COMUNES (24 V DC)



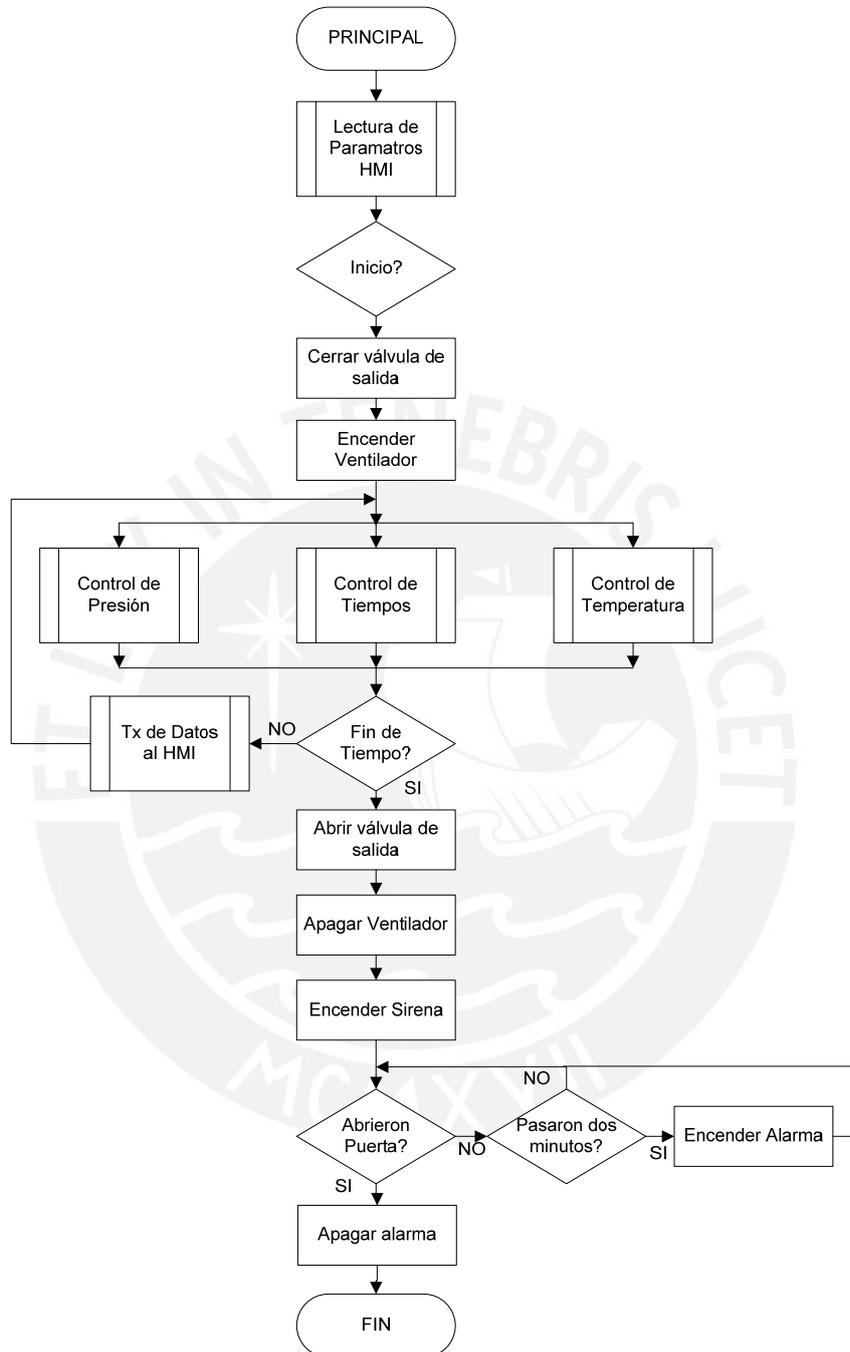
| | | | | | | | | |
|---|-----|----------|---|--------------|---|---------------|---------------|---------|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 4.1 BORNERAS COMUNES 24 VDC | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. | | | |
| ESQUEMA Nº: | 9 | HOJA Nº: | 6 | Nº DE HOJAS: | | 13 | DIBUJADO POR: | J.E.R.S |
| ESCALA: | S/E | FECHA: | | | | REVISADO POR: | L.A.O.S | |



| | | | | | |
|--|----------------------|--------------------------|---|--|---|
| DENOMINACIÓN: ANEXO 5 DIAGRAMA DE INSTRUMENTACION | | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ | |  INDUSTRIAL CONDOR S.A.C. |
| ESQUEMA N°: 1 | HOJA N°: 1 | N° DE HOJAS: 1 | DIBUJADO POR: J.E.R.S | | |
| ESCALA: S/E | FECHA: | | REVISADO POR: L.A.O.S | | |

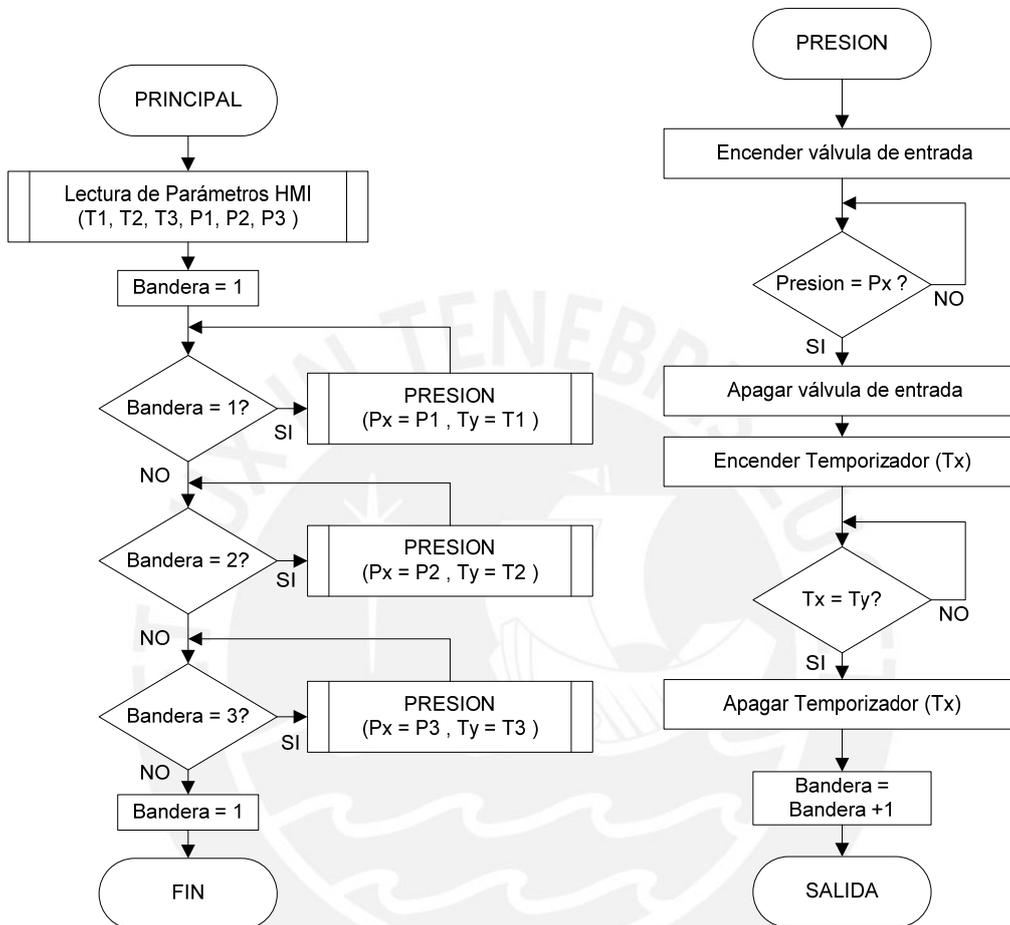
ANEXO 6:

DIAGRAMA DE FLUJO PROGRAMA PRINCIPAL



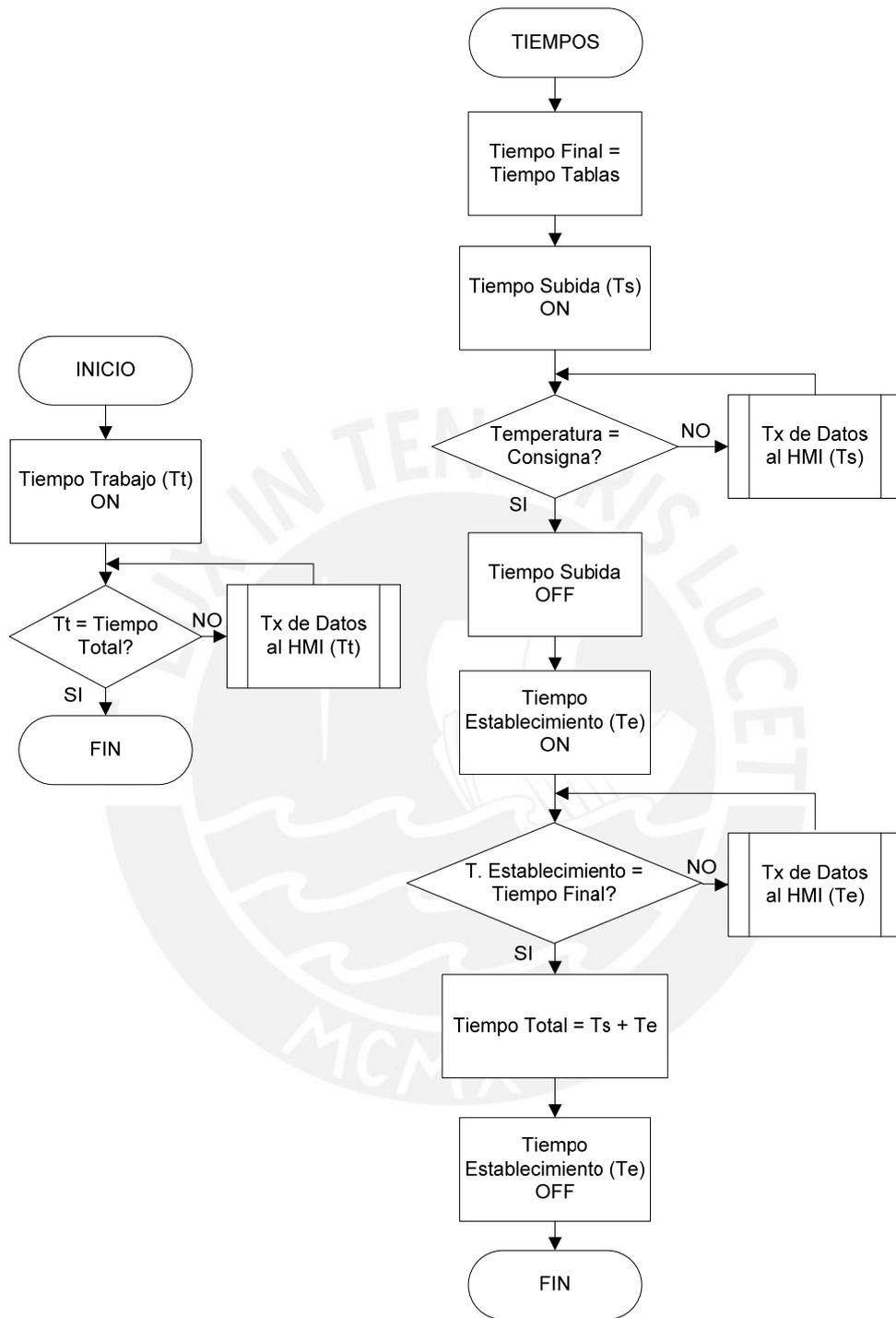
ANEXO 7:

DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE PRESION

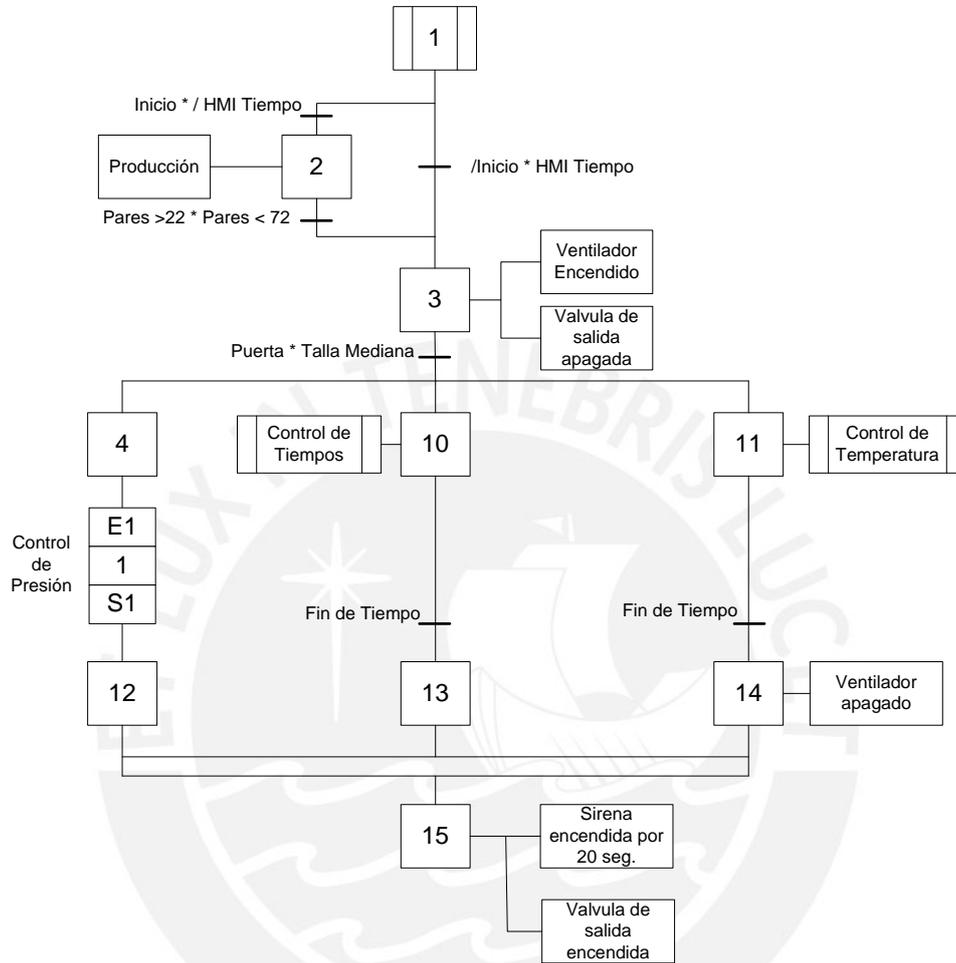


ANEXO 8:

DIAGRAMA DE FLUJO CONTROL DE TIEMPOS

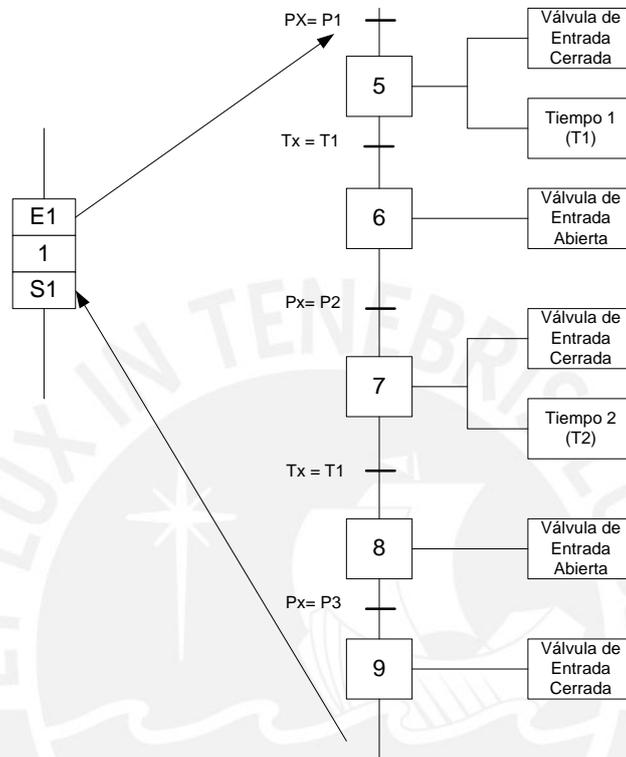


ANEXO 9:
GRAFSET PROGRAMA PRINCIPAL



ANEXO 10:

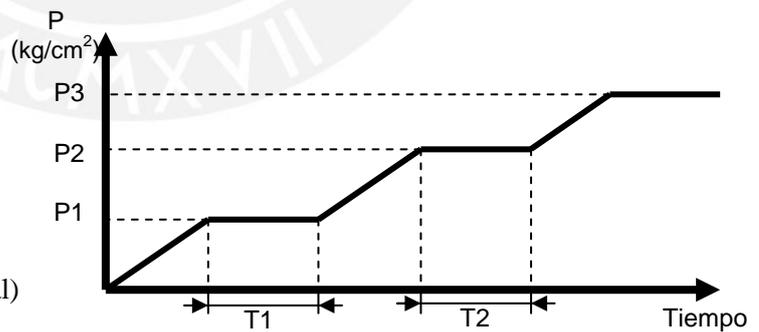
GRAFSET AUTOMATIZACION DE PRESION



Nota:

La automatización del control de presión se realiza por medio de una Macro Etapa.

- Sensor de Presión= Px
- Temporizador = Tx
- Tiempo 1 = T1
- Tiempo 2 = T2
- Presión 1 = P1
- Presión 2 = P2
- Presión 3 = P3 (Presión Final)



ANEXO 11:

PANTALLAS DEL HMI



Fig1. Pantalla Saludo

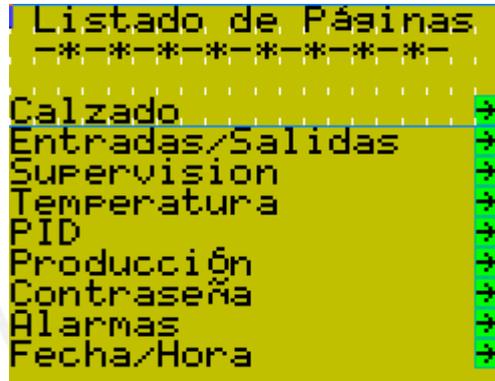


Fig. 2 Listado de páginas

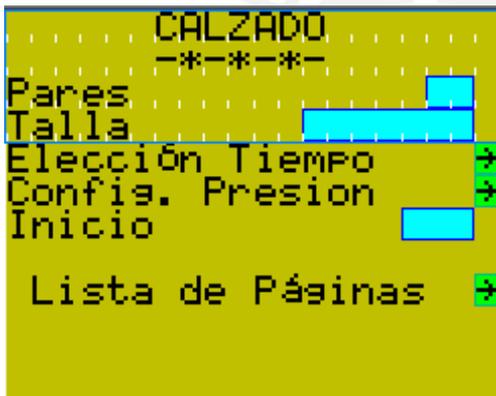


Fig.3 Calzado

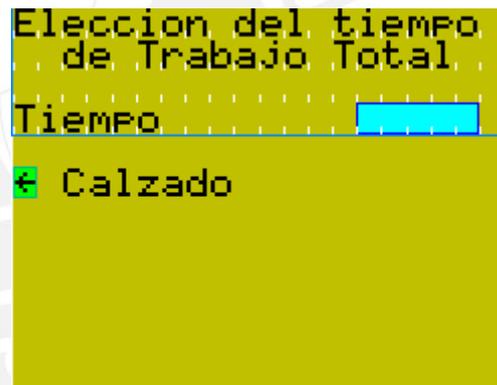


Fig. 4 Elección del tiempo de trabajo total

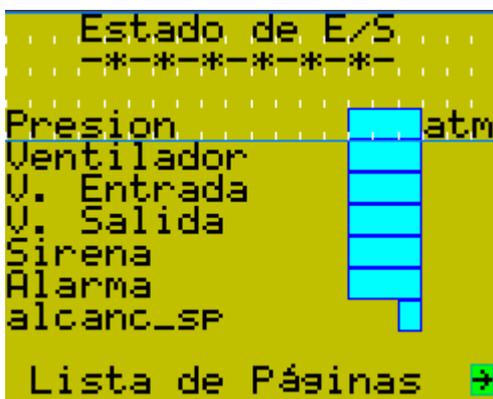


Fig.5 Entradas/ Salidas

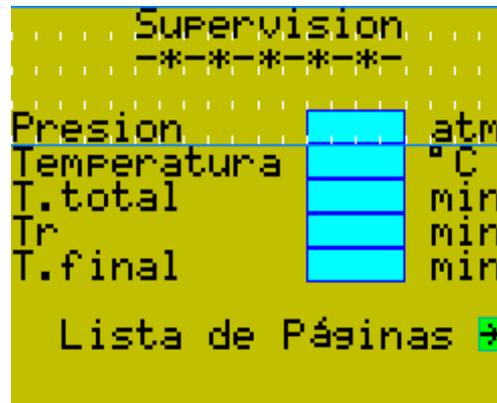


Fig. 6 Supervisión

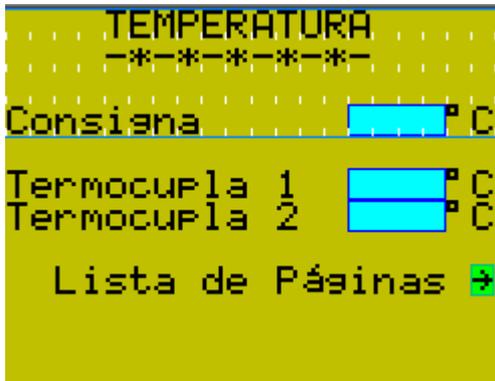


Fig.7 Temperatura



Fig. 8 PID



Fig.9 Producción

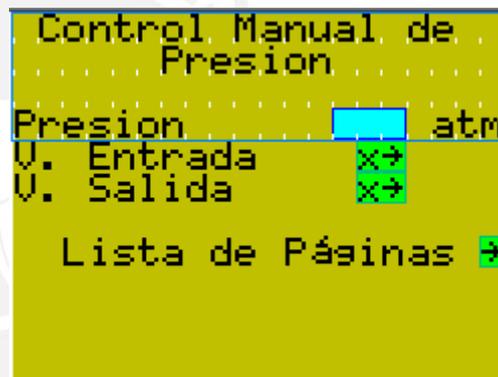


Fig.10 Control Manual de Presión



Fig. 11 Contraseña



Fig.12 Alarma 1

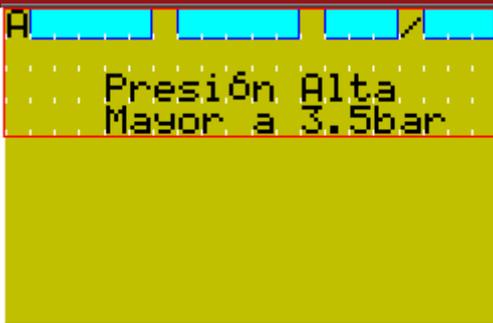


Fig. 13 Alarma 2

Notas:

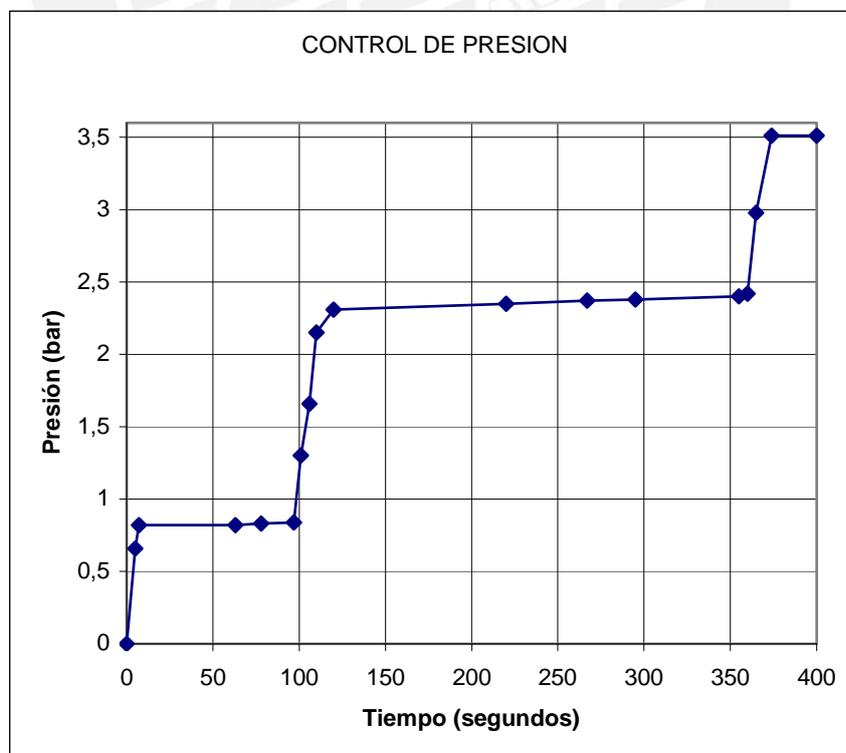
- Cada rectángulo celeste representa los valores que el HMI intercambia con el autómatas cuando se encuentra trabajando.
- Cada flecha de color verde indica un enlace a otra página de aplicación desarrollada en el HMI.



ANEXO 12:

RESULTADOS CONTROL DE PRESION

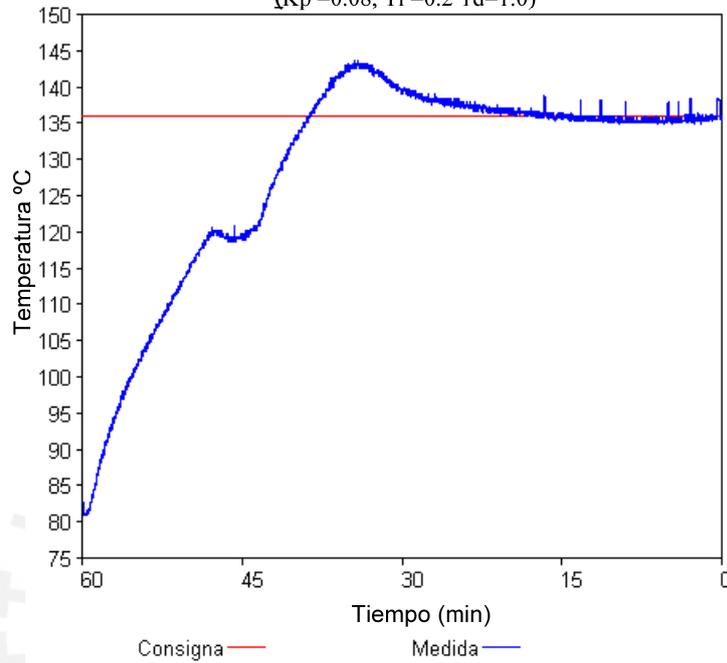
| Tiempo (segundos) | Presión (atm) |
|-------------------|---------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0.66 |
| 7 | 0.82 |
| 63 | 0.82 |
| 78 | 0.83 |
| 97 | 0.84 |
| 101 | 1.3 |
| 106 | 1.66 |
| 110 | 2.15 |
| 120 | 2.31 |
| 220 | 2.35 |
| 267 | 2.37 |
| 295 | 2.38 |
| 355 | 2.4 |
| 360 | 2.42 |
| 365 | 2.98 |
| 374 | 3.51 |
| 400 | 3.51 |



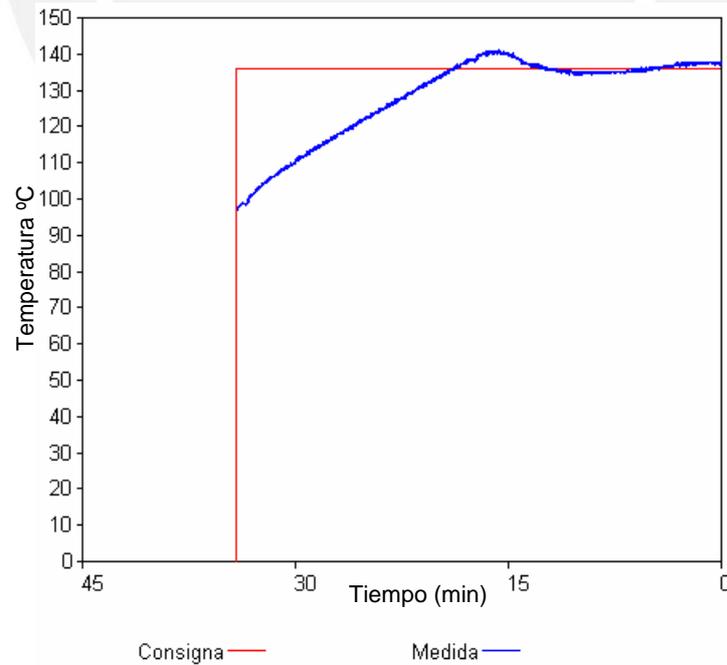
ANEXO 13:

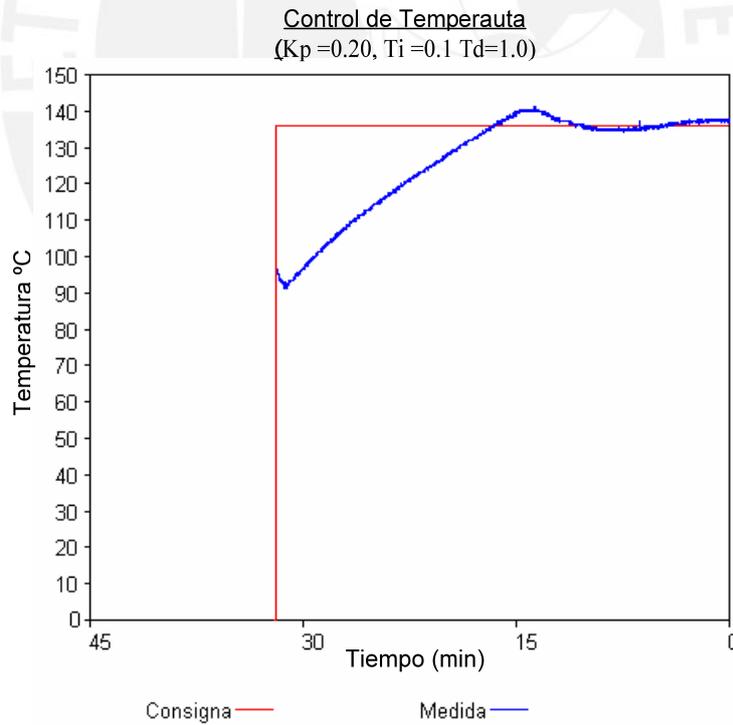
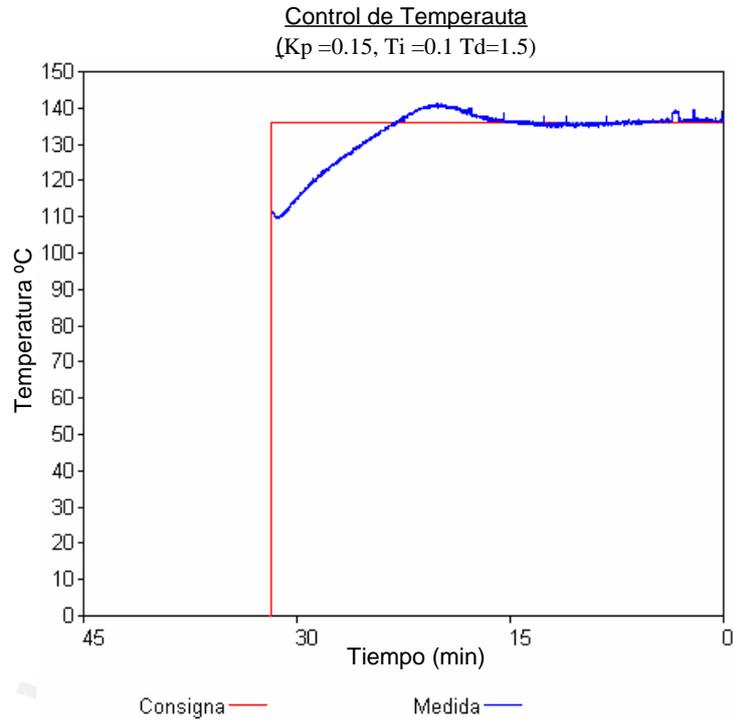
RESULTADOS CONTROL DE TEMPERATURA

Primera Carga del día
Control de Temperatura
($K_p = 0.08$, $T_i = 0.2$ $T_d = 1.0$)

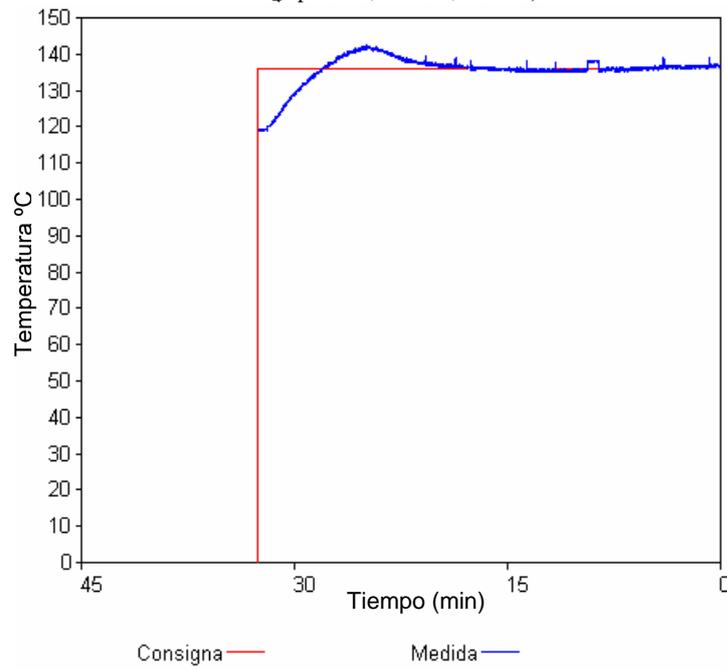


Control de Temperatura
($K_p = 0.15$, $T_i = 0.1$ $T_d = 1.0$)

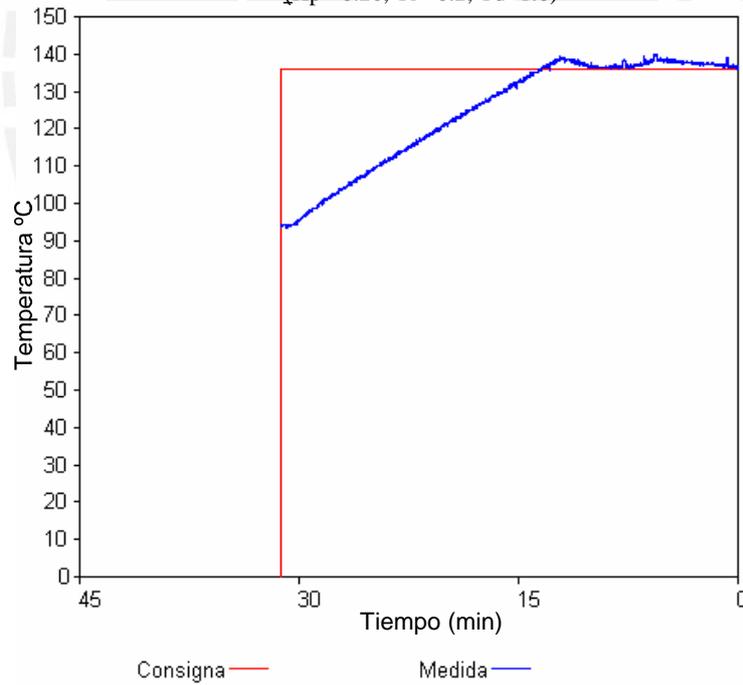


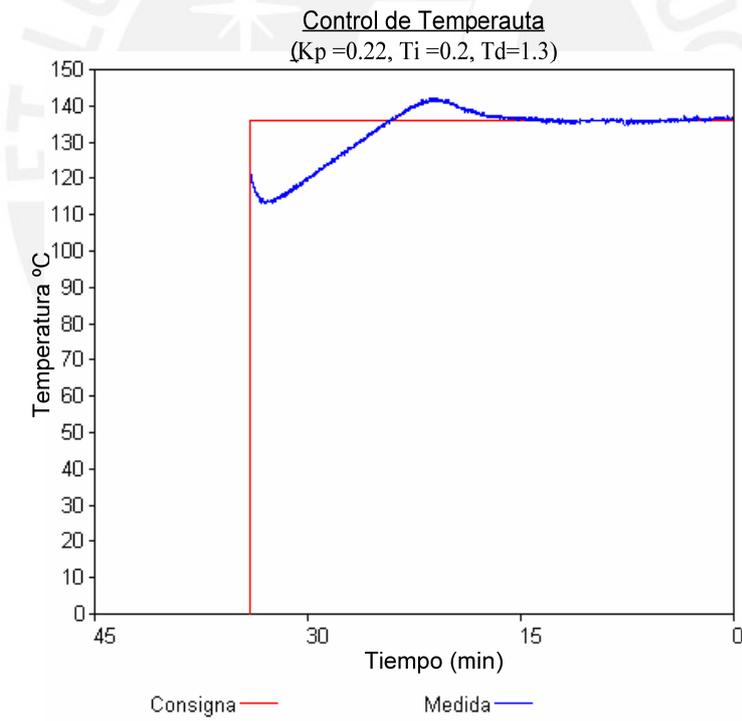
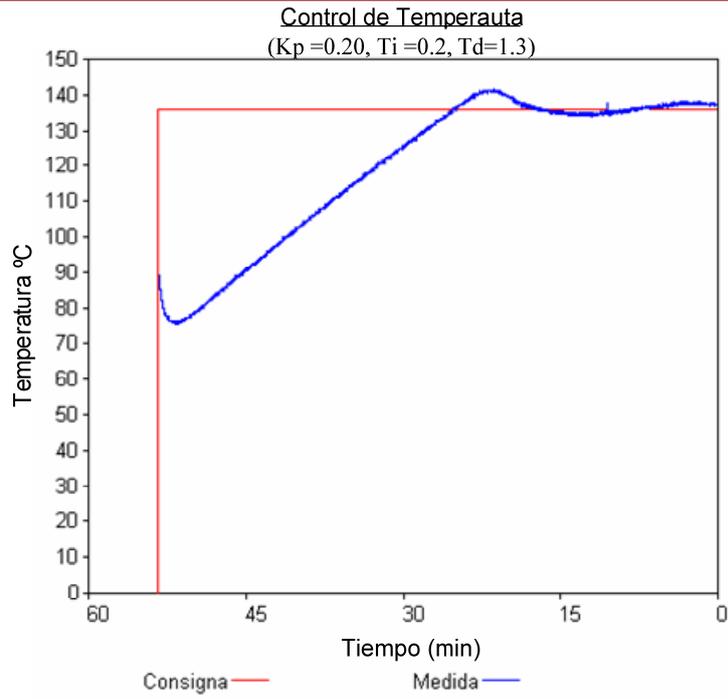


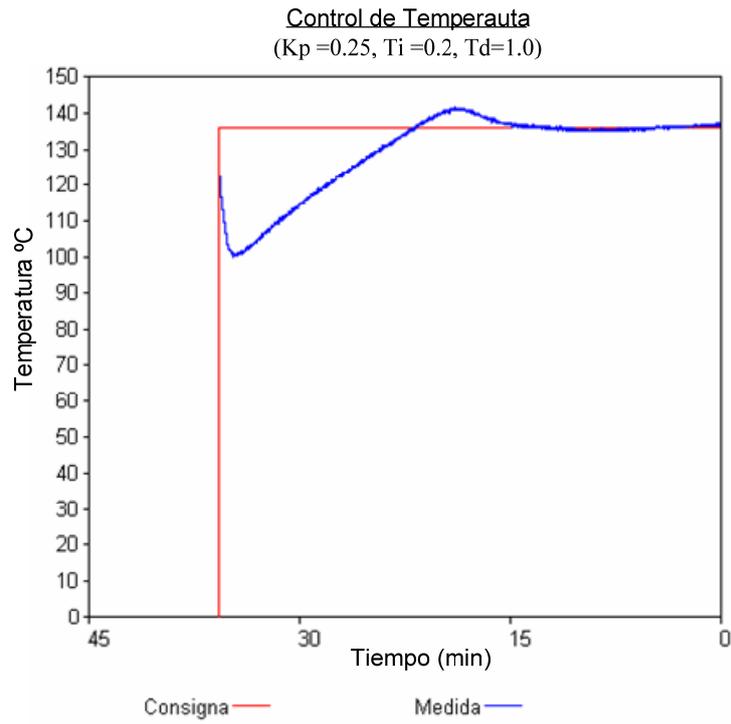
Control de Temperatura
($K_p = 0.20$, $T_i = 0.2$, $T_d = 1.0$)



Control de Temperatura
($K_p = 0.20$, $T_i = 0.2$, $T_d = 1.0$)



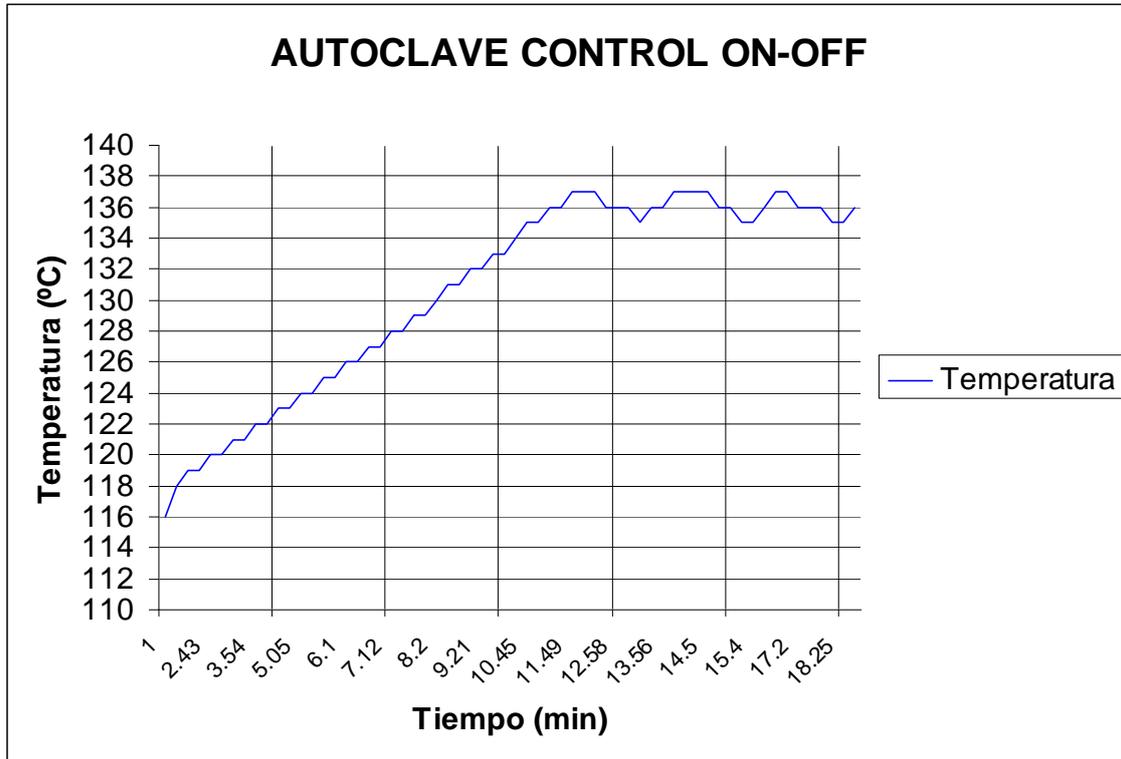




ANEXO 14: RESULTADOS CONTROL ON – OFF

| Temperatura (°C) | Tiempo (s) |
|------------------|------------|
| 116 | 1 |
| 118 | 1.3 |
| 119 | 2 |
| 119 | 2.12 |
| 120 | 2.43 |
| 120 | 3.15 |
| 121 | 3.24 |
| 121 | 3.48 |
| 125 | 5.45 |
| 126 | 6.1 |
| 126 | 6.2 |
| 127 | 6.42 |
| 127 | 6.56 |
| 128 | 7.12 |
| 128 | 7.2 |
| 129 | 7.44 |
| 129 | 7.5 |
| 130 | 8.2 |
| 131 | 8.46 |
| 131 | 8.5 |
| 132 | 9.05 |
| 132 | 9.21 |
| 133 | 9.48 |
| 133 | 9.5 |
| 135 | 10.45 |
| 136 | 11.15 |
| 136 | 11.2 |
| 137 | 11.49 |
| 137 | 11.5 |
| 137 | 12.3 |
| 136 | 12.58 |
| 136 | 13.08 |
| 135 | 13.5 |
| 137 | 14 |
| 137 | 14.2 |
| 137 | 14.41 |
| 137 | 14.5 |
| 136 | 14.58 |
| 136 | 15.1 |
| 135 | 15.2 |
| 135 | 15.4 |
| 136 | 16.12 |
| 137 | 16.3 |
| 137 | 17.15 |
| 136 | 17.2 |
| 136 | 17.45 |
| 136 | 17.47 |
| 135 | 17.58 |
| 135 | 18.25 |
| 136 | 18.32 |

Gráfica del control On Off



ANEXO 16: FOTOS -AUTOMATIZACION DE AUTOCLAVE



Fig. 1 Tablero de control

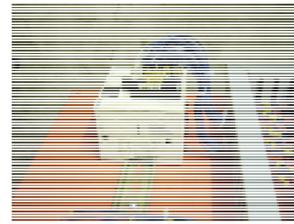


Fig. 2 Conexion del PLC Twido



Fig. 3 Relés de estado sólido



Fig. 4 Transductor de Presión y Manómetro



Fig. 5 Válvula de entrada



Fig. 5 Válvula de salida

GABINETE

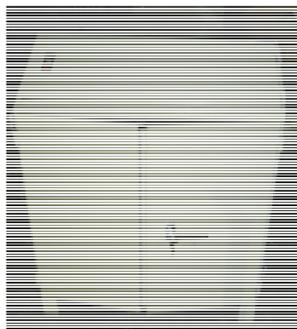


Fig. 6 Vista frontal



Fig. 7 Puertas abiertas