

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Automatización e incorporación al sistema CCM de control en tiempo real de una prensa vulcanizadora para la producción de llantas**

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

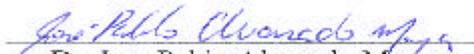
**Marco Antonio Pérez Espinosa**

**Cartago, Octubre del 2005**

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
PROYECTO DE GRADUACIÓN  
TRIBUNAL EVALUADOR

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

Miembros del Tribunal

  
Dr. Ing. Pablo Alvarado Moya

Profesor lector



Ing. Pedro Murillo

Profesor lector

  
Ing. William Martín Moreno

Profesor asesor



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

Cartago, 7 de Octubre del 2005

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

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

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

Heredia, Octubre del 2005

*Marco Pérez Espinosa*

Marco Antonio Pérez Espinosa

Céd: 1-1104-0983

## **Resumen**

En la empresa Bridgestone Firestone de Costa Rica S.A., se cuenta con numerosa maquinaria para poder llevar a cabo el proceso de producción de llantas y materiales para recauche. Sin embargo, a pesar de ser una corporación de gran tamaño a nivel mundial, no escapa al hecho de que la tecnología avanza día con día y sus equipos o maquinaria pueden quedar obsoletos.

Como parte de todo esto, es que nace la necesidad de esta empresa de realizar un proyecto de modernización masivo en ciertos sectores de la línea de producción, como lo es la sección de curado de las llantas, en donde se cuenta con 72 prensas de diferentes tipos, modelos y características, a las cuales se les esta realizando una serie de trabajos para introducirlas a un nuevo sistema de verificación y control llamado el CCM (Computer Cure Monitor).

De estas 72 prensas, hay un grupo de 20 prensas, las cuales son las más antiguas de toda la planta, por lo que la introducción de éstas al nuevo sistema CCM se dificulta en gran manera, haciéndose necesario un trabajo menos técnico y más ingenieril, ya que no consiste en simplemente programar un PLC, sino que se deben diseñar diferentes controles y sistemas.

El objetivo de éste proyecto es realizar la introducción de una de estas prensas, específicamente la número 20, al nuevo sistema, para lo cual es necesaria no sólo la automatización total de la máquina, sino el diseño de un controlador de temperatura, lo cual es el principal obstáculo para la realización de dicho trabajo de modernización.

**Palabras clave:** curado de llantas, CCM, PLC.

## **Summary**

The Bridgestone Firestone CORP. in Costa Rica has numerous machines for the production process of tires and retread materials. Although this is a world class corporation, it does not escape the fact that its machinery might become obsolete.

Therefore it is necessary for this company to perform a modernization in certain sectors of its production line, for example, the tires cure, where they count with 72 presses of different types, models and characteristics. Each one is being modified to a series of tasks so it could be introduced to a new monitoring and control system called the CCM (Computer Cure Monitor).

Of these 72 presses, 20 presses are too old, which make it very hard to fit them to the new CCM system, so a less technical work has to be made. Instead of simply programming a PLC, it requires a designing of rather different controls and systems.

The objective of this project is to carry out the integration of one of these presses, specifically the number 20, to the new system, where it is necessary not just the total automation of the machine, but the design of a controller of temperature which is the bigger obstacle for the realization of this modernization work.

**Words key:** cured of tires, CCM, PLC.

## **Dedicatoria**

Le dedico este gran logro a un par de personas sumamente especiales, quienes han sido siempre un apoyo incondicional, una guía en el tortuoso camino de la vida, una fuente inagotable de amor y sabiduría para todos los que estamos cerca y tenemos la gran dicha de ser parte de sus vidas. Le dedico esto a quienes han sido una luz de esperanza en todo momento, a quienes han sido los grandes guías de tres generaciones de una gran familia.

Gracias abuelo, gracias abuela... Esto es para ustedes...

## **Agradecimientos**

Primero quiero agradecerle a Dios por darme las fuerzas para seguir adelante en todo momento, por enseñarme que hay que levantarse después de cada caída y por darme el entendimiento necesario para sobrellevar la vida día a día.

Quiero agradecer a mis padres, quienes siempre tuvieron confianza en mi y me alentaron a mantenerme en pie hasta en los momentos de mayor flaqueza. Gracias a toda mi familia, a mis abuelos, a mis tías, a mis primos, gracias por un apoyo incondicional y por exhortarme a seguir siempre adelante sin importar las adversidades.

Gracias a esa persona especial quien fuera siempre una fuente de apoyo, confianza, motivación, solidaridad, sostén y consuelo.

Gracias a todos mis amigos porque de una u otra manera, estuvieron para ayudarme y aconsejarme cuando lo necesitaba. A todos aquellos compañeros y compañeras que me tendieron su mano y me apoyaron en todo sentido.

Por último, quiero agradecer a todas las personas de Bridgestone Firestone de Costa Rica S.A. que tuvieron confianza en mi y me permitieron realizar este proyecto con el cual cierro un ciclo más en mi vida. Gracias a mi asesor el ingeniero Gustavo Villalobos por todo su apoyo, al ingeniero Daniel Solís por su confianza, a Julio Jiménez y a todos los ingenieros del departamento de proyectos de ingeniería y del departamento de mantenimiento por su apoyo y por su ayuda cuando la necesité. Gracias a todos los técnicos de división tres, a todos los eléctricos, mecánicos y supervisores que me extendieron su ayuda, en especial al supervisor don Joaquín Viquez, al mecánico Roberto Ledezma y al supervisor Víctor Espinoza. También quiero agradecer al ingeniero Alfredo Vargas y al ingeniero Carlos Esquivel, porque gracias a ellos tuve la oportunidad de formar parte de esa gran familia que es Bridgestone Firestone.

## ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1.....	13
Introducción.....	13
1.1 Problema existente e importancia de su solución.....	13
1.2 Solución seleccionada.....	16
Capítulo 2.....	21
Meta y Objetivos.....	21
2.1 Meta.....	21
2.2 Objetivo General.....	21
2.3 Objetivos Específicos.....	21
2.3.1 Objetivo de hardware.....	21
2.3.2 Objetivos de software.....	21
2.3.3 Objetivos de documentación.....	22
2.3.4 Objetivos de implementación.....	22
Capítulo 3.....	23
Marco Teórico.....	23
3.1 Descripción del sistema a mejorar.....	26
3.2 Descripción de los principales principios eléctricos de la solución.....	36
3.2.1 Funciones de transferencia.....	36
3.2.2 Métodos gráficos para la solución.....	38
3.2.3 Sistemas de control.....	40
Capítulo 4.....	42
Procedimiento Metodológico.....	42
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	42
4.2 Obtención y análisis de información.....	43
4.3 Evaluación de alternativas y síntesis de la solución.....	47
4.4 Implementación de la solución.....	52
Capítulo 5.....	60
Explicación del diseño.....	60
5.1 Selección final de la solución.....	60
5.2 Descripción del hardware.....	76
5.3 Descripción del software.....	83
5.3.1 Principal.....	83
5.3.2 Mapeo de I/O's.....	84
5.3.3 Prensa.....	85
5.3.4 Cargadores.....	86
5.3.5 Descargadores.....	88
5.3.6 Formado o Shaping.....	88
5.3.7 Temp PID.....	89
5.3.8 CCM.....	89
Capítulo 6.....	91

Análisis de resultados .....	91
6.1 Resultados.....	91
6.2 Análisis .....	96
Capítulo 7.....	101
Conclusiones y recomendaciones.....	101
7.1 Conclusiones .....	101
7.2 Recomendaciones .....	103
Bibliografía .....	104
Apéndices .....	106
A.1 Glosario y abreviaturas .....	106
A.1.1 Glosario .....	106
A.1.2 Abreviaturas.....	107
A.2 Monitoreo de las temperaturas de los platten .....	108
A.3 Reporte y resultados de la prueba de termocuplas .....	111
A.4 Descripción de la empresa .....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Lazo de 4-20 mA.....	18
Figura 1.2	Diagrama de bloques del hardware del proyecto.....	19
Figura 1.3	Diagrama de bloques de la comunicación de elementos.....	20
Figura 3.1	Proceso productivo de Bridgestone Firestone de Costa Rica S.A [8]. ...	25
Figura 3.2	Brazo acarreador de llanta verde.....	27
Figura 3.3	Vista de la prensa abierta.....	28
Figura 3.4	Enclaves y contactores del antiguo control de la prensa.....	29
Figura 3.5	Fondo de la puerta del antiguo gabinete de control.....	29
Figura 3.6	Antiguo panel del operador.....	30
Figura 3.7	Elementos de monitoreo de la prensa.....	31
Figura 3.8	Diagrama de flujo de funcionamiento de la prensa vulcanizadora.....	32
Figura 3.8	Diagrama de flujo de funcionamiento de la prensa vulcanizadora (continuación).....	33
Figura 3.8	Diagrama de flujo de funcionamiento de la prensa vulcanizadora (Continuación).....	34
Figura 3.9	Temporizador que controla las válvulas de la prensa.....	35
Figura 3.10	Determinación de las constantes $R$ y $L$ [6].....	39
Figura 3.11	Diagrama de bloques de un compensador PID práctico.....	41
Figura 3.12	Esquema del regulador PID.....	41
Figura 4.1	Diagrama de flujo del funcionamiento de los brazos cargadores.....	44
Figura 4.1	Diagrama de flujo del funcionamiento de los brazos cargadores (Continuación).....	45
Figura 4.2	Diagrama de flujo del funcionamiento de los brazos descargadores.....	46
Figura 4.3	FieldPoint de National Instruments.....	48
Figura 4.4	Colocación de termocuplas en la llanta.....	54
Figura 4.5	Distribución lateral inferior de las termocuplas.....	55
Figura 4.6	Distribución lateral superior de las termocuplas.....	55
Figura 4.7	Paso de los cables de las termocuplas por el anillo inferior del bladder.....	56
Figura 4.8	Termocuplas adheridas a la llanta luego del vulcanizado.....	57
Figura 5.1	Diagrama de bloques del sistema a controlar.....	61
Figura 5.2	Determinación de un modelo aproximado sobre amortiguado de segundo orden [2].....	63
Figura 5.3	Gráfico de $\lambda$ vrs. $H$ [2].....	65
Figura 5.4	Comparación de las curvas de respuesta de ambos lados.....	67
Figura 5.5	Curva normalizada y escalón aplicado.....	68
Figura 5.6	Tangente a la curva de respuesta de la temperatura.....	69
Figura 5.7	Cálculo de $\eta$ .....	70
Figura 5.8	Determinación del 63% de $\Delta PV$ y $T_3$ .....	73
Figura 5.9	Conexión entre los dispositivos del sistema.....	78
Figura 5.10	Dispositivos Rosemount.....	79
Figura 5.11	Conexión de la RTD, el dispositivo Rosemount, el graficador y el módulo de entradas analógicas del PLC.....	80
Figura 5.12	Conexión del PLC con el transductor de corriente a presión.....	81

Figura 5.13	Regulación de presión de la válvula mecánica por el transductor.....	82
Figura 5.14	Conexión neumática del transductor y el regulador de aire .....	82
Figura 6.1	Vista superior del interior del panel de control .....	91
Figura 6.2	Vista inferior del interior del panel de control .....	92
Figura 6.3	Vista interior de la puerta del panel de control .....	92
Figura 6.4	Vista frontal exterior del panel de control .....	93
Figura 6.5	Gráfico del comportamiento de la temperatura desplegado por el CCM95	
Figura A.3.1	Curvas de las diferentes temperaturas de la prueba de termocuplas .....	115

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1	Comparación de posibles equipos a utilizar en el proyecto.....	50
Tabla A.2.1	Muestreo de las temperaturas de los platten .....	108
Tabla A.3.1	Temperaturas muestreadas durante la prueba de termocuplas .....	113

## Capítulo 1 Introducción

---

En este capítulo se pretende explicar o justificar el proyecto, detallando aspectos como el origen del problema a resolver y la importancia de su solución. Además se hará breve referencia, a la técnica utilizada para la solución del problema.

### 1.1 Problema existente e importancia de su solución

Actualmente, la empresa cuenta con 72 prensas vulcanizadoras de llantas, de las cuales, 20 trabajan con una automatización ya obsoleta a base de contactores y levas, además de que el control existente es totalmente independiente, lo que quiere decir que no permite un cambio de parámetros de manera remota, sino que es necesario que el personal del laboratorio se presente en la prensa con un técnico de instrumentación para configurar el equipo; todas las demás (excepto las ya introducidas al CCM), aunque cuentan con alguna automatización en su funcionamiento mecánico, no tienen un sistema de control de parámetros y variables en tiempo real, lo que se traduce en grandes limitantes para el sistema de producción.

El problema es que cuando alguna de las variables físicas se sale de los límites aceptables para que la llanta se encuentre dentro de los estándares de calidad aceptados por la empresa, esto se detecta, aproximadamente cada dos horas (esto si se trata de una falla de temperatura o de presión en el ciclo de vulcanizado), lo que se traduce en cuantiosas pérdidas para la empresa dependiendo del tiempo durante el cual se presentó la falla, ya que todas las llantas que se curaron bajo estas condiciones se deben desechar. Cabe destacar que las prensas trabajan 24 horas, 7 días a la semana.

Los límites mencionados se refieren a temperaturas y presiones mínimas y máximas dentro de las que se debe mantener el proceso, las cuales varían según el ciclo estipulado por la receta y el paso respectivo de cada ciclo. Sin embargo se conocen

algunas tolerancias fijas de estas variables, como lo son las temperaturas externas (máx: 182° C, mín: 160° C), las temperaturas internas (máx: 82° C, mín: 49° C) y las presiones, que pueden ir desde los 50 psi (aproximadamente unas 3.4 atm) hasta los 300 psi (aproximadamente unas 20.4 atm).

Además de esto, existe la problemática de los tiempos muertos de producción, es decir, los tiempos en los que las prensas de vulcanizado están detenidas. El problema en cuanto a esto, es que los técnicos del departamento de mantenimiento, deben detener las prensas para realizar labores de limpieza o mantenimiento preventivo, pero para realizar estos trabajos, se les solicita hacer un reporte de la detención de las prensas al laboratorio y solicitar un permiso para realizar el paro al departamento de producción, con el fin de tener un control del funcionamiento de las máquinas.

Sin embargo los técnicos, por tratar de evitar problemas de atrasos en el trámite de los permisos, muchas veces simplemente detienen las máquinas de una manera no programada. Esto repercute también en el aspecto económico de la empresa, ya que cuando aparecen estos tiempos muertos no se pueden justificar debidamente.

Estos aspectos, además de otros menos importantes, como por ejemplo el hecho de tener que ir hasta cada prensa para introducir las recetas correspondientes a cada tipo de llanta, hacen que todo el proceso de producción no sea tan eficiente como se desea.

Además, se busca evitar errores del tipo humano, los cuales se dan al hacer la programación de las recetas de manera manual para todas las prensas. Esto es un problema que aunque poco frecuente, ha ocurrido.

Adicionalmente, con este proyecto también se debían solucionar, problemas de otro tipo, como por ejemplo tener un control de vida útil de los bladders<sup>1</sup>, y poder localizar los diferentes moldes de una manera más rápida y agilizada, porque muchas veces

---

<sup>1</sup> Ver glosario en apéndice A.1

no se lleva un control bien definido de los moldes que están en determinadas prensas, o cuales están en inventario o en limpieza.

Debido a un proyecto corporativo, iniciado en la planta ubicada en Canadá, se ha empezado a implementar un nuevo sistema llamado CCM (Computer Cure Monitor), que además de poder observar y controlar las principales variables físicas que afectan el proceso de vulcanizado, puede estar preparado para manejar los ciclos del proceso, descarga de recetas, inventarios de bladders, mantenimiento de moldes, control de tiempos muertos y eficiencia de la máquina, es decir, se logran solventar todos los problemas existentes (o por lo menos la gran mayoría) con respecto a este proceso de formación y moldeo de las llantas.

Este proyecto ya se está llevando a cabo, sin embargo, debido a la gran diversidad de prensas con las que cuenta la empresa, con distintas características y funciones específicas, existen algunos grupos de prensas que presentan más problemas que otros, o que presentan una mayor dificultad al trasladarlas al nuevo sistema CCM, como es el caso de las ya mencionadas prensas que no cuentan con ningún tipo de automatización ni control, ya que estas trabajan a base de contactores y sus sistemas son muy antiguos. Debido a esto y a la falta de tiempo es que la empresa necesita contratar servicios especializados en el área de control y automatización para llevar a cabo dicho trabajo en algunas prensas, lo que le imprime alta prioridad a éste proyecto.

## 1.2 Solución seleccionada

Este proyecto debió implementarse siguiendo ciertos requerimientos establecidos por la empresa, como el cumplimiento de estándares de programación propios de la misma, los cuales exigen que los programas realizados estén 100% comentados, sean subdivididos y siguiendo siempre la estructura de las prensas modelo 385-48 de Rogers®, debe haber comentarios por bloques o secciones de programa, etc. Es importante mencionar que, a pesar de que en cuanto a esto el departamento de ingeniería es bastante exigente, no existe un documento en el cual se especifiquen todos estos aspectos, sino que son exigidos por los ingenieros de toda la corporación.

También existen requerimientos con respecto a como debía quedar la prensa funcionando, así por ejemplo, debía tener un Panelview (debe ser marca Allen-Bradley® de la familia Panelview Plus 1000®) con pantalla de tacto, en el cual se pueden visualizar todas las variables del proceso (temperaturas, presiones, posiciones del encoder, el estado de las válvulas que se activan por paso del ciclo de curado, etc.), sus respectivos ajustes, el estado del ciclo de curado así como el estado de cada uno los pasos del ciclo, debía ser capaz de comunicarse con un servidor por medio de una red de tecnología Ethernet y fibra óptica.

Con respecto al panel del operador, debía ser Nema-4 (contra agua), con sellos en las puertas, con todas las acometidas en tubería americana y accesorios. Todo el control de la prensa debía ser realizado por el PLC y todo el equipo necesario debe ser marca Allen Bradley®, lo cual además de ser un requerimiento, se convirtió también en una limitante para el proyecto.

Con respecto a seguridad laboral y salud ocupacional, se debe cumplir absolutamente toda la legislación nacional existente en la materia y que aplique al tipo de trabajo que se va a realizar y la maquinaria que se va a utilizar (Código del Trabajo, Reglamento General de Seguridad e Higiene del Trabajo, etc.). Así por

ejemplo, se deben cumplir los reglamentos establecidos por las *Normas Técnicas en Salud Ocupacional*, aprobadas como norma técnica nacional, mediante el proceso definido a través del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) y aceptadas por el Sistema de Riesgos del Trabajo, que en la sección 13.110 Seguridad de las máquinas, se encuentra la norma INTE 31-04 -02-97 (Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en maquinaria, equipos y accesorios en los centros de trabajo)<sup>2</sup>.

Además en la corporación existe un reglamento de seguridad [10], el cual está basado en la normativa OSHA. La política corporativa es que en caso de ausencia de legislación nacional, se debe cumplir esta normativa. En este documento existen apartados tales como: Personal Protective Equipment, New Equipment Checkout Release, Electrical Safety-Related Work Practices, Lockout-Tagout y NRM Curing Press Loaders – Inspection Requirements and Safe Work Practices, los cuales se deben cumplir cuando se realicen los trabajos de instalación de equipo en la prensa.

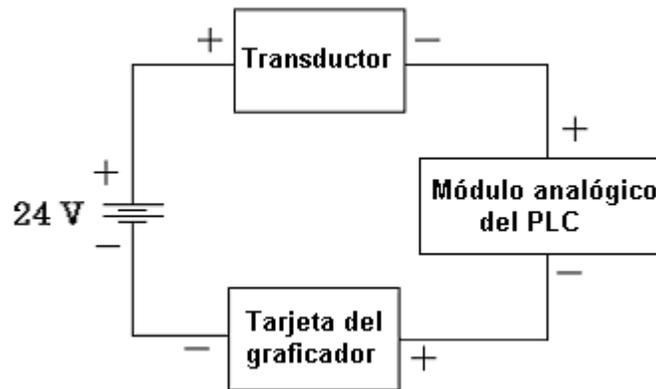
Todo esto se debe a que la empresa cuenta con diversas certificaciones como lo son las ISO/TS 9001:2000 apartado 16949 e ISO 14001, lo cual los obliga a mantener siempre un alto grado de control en todos los procesos, incluyendo a los relacionados con la ingeniería.

La solución, básicamente consistió en conectar los sensores ubicados en la prensa y enviar los datos censados a un PLC para su debido procesamiento, también se debió enviar los datos usando el protocolo http tomados en tiempo real, para ser graficados en una pantalla remota conectada al sistema por medio de la red al servidor, es decir, cualquier computadora conectada a la red, con el fin de que las estadísticas del proceso diario pudieran ser vistas por cualquier trabajador de la empresa que estuviera autorizado para hacerlo.

---

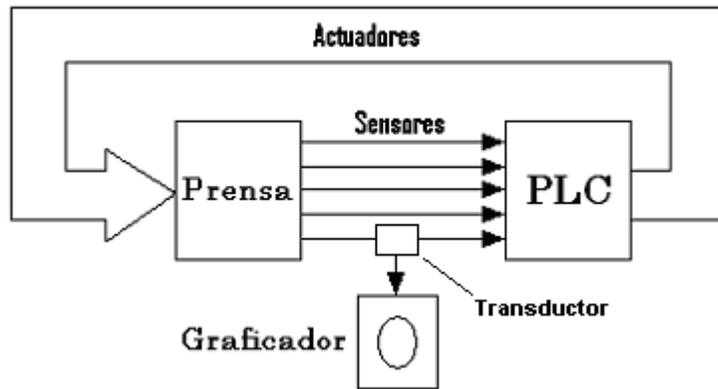
<sup>2</sup> Publicado en el Diario Oficial La Gaceta del jueves 14 de enero de 1999.

Se incorporaron los sensores de las diferentes variables mencionadas, a un transductor para enviar los valores censados por éstos a módulos de entradas analógicas de un PLC marca Allen Bradley® modelo SLC 5/05, las mismas están en serie junto con una fuente de 24 V<sub>CD</sub> y un graficador marca ABB®, cerrando entre todos los componentes un lazo de 4 – 20 mA. La figura 1.1 ilustra esta conectividad.



**Figura 1.1** Lazo de 4-20 mA

La idea es que los sensores ubicados en la prensa, se conecten al controlador lógico programable para que éste procese la información. Luego, mediante una serie de actuadores como válvulas, pistones y motores, la prensa realiza diferentes actividades según corresponda. Como una medida para “ahorrar” módulos de entrada en el PLC, el graficador se dispuso independiente del controlador, lo que quiere decir que la señal que llega a éste, va directamente desde el transductor correspondiente (figura 1.2).



**Figura 1.2** Diagrama de bloques del hardware del proyecto

Para la realización de todo el control de la máquina, tanto el control de los movimientos mecánicos, los aspectos eléctricos y todo lo referente al control del ciclo de curado y monitoreo del mismo, se debió realizar, como se indicó anteriormente, por medio de un PLC, por lo que este programa debió ser tal que, el PLC fuera capaz de comunicarse con el servidor por medio de tecnología Ethernet, en el cual se encuentra la aplicación http.

Con respecto a esto último, el controlador debía comunicarse con un servidor “intermedio” llamado Satellite, el cual es el encargado de controlar los estados de todos los PLC’s dispuestos para el CCM. Sin embargo, los usuarios que necesiten cambiar parámetros del ciclo de curado de alguna prensa en especial, o bien, simplemente descargar una nueva receta, deben acceder por medio de un servidor llamado Host.

Entonces, el servidor Satellite está dispuesto más que todo para comunicación con las prensas, deben haber como máximo 80 prensas por Satellite, por esta razón en la planta solo existe un servidor Satellite (72 prensas). El servidor Host, contiene todas las bases de datos necesarias para el sistema y por esta razón, es que el Host se debe comunicar con el Satellite para realizar cualquier cambio en el proceso, tal y como se aprecia en la figura 1.3.



**Figura 1.3** Diagrama de bloques de la comunicación de elementos

## **Capítulo 2**

### **Meta y Objetivos**

---

#### **2.1 Meta**

Reducir o minimizar los costos de producción de la planta por desviación de parámetros o inactividad de las máquinas mediante la modernización del control existente sobre el proceso de curado de las llantas.

#### **2.2 Objetivo General**

Introducir una prensa vulcanizadora de llantas a un nuevo sistema de control y verificación para mejorar el proceso de moldeado y curado de llantas.

Diseñar e implementar el control de temperatura necesario, para que la prensa vulcanizadora #20 pueda ser introducida al nuevo sistema CCM y que se puedan controlar, de manera automática y en tiempo real, todas las variables del proceso de curado de las llantas.

#### **2.3 Objetivos Específicos**

##### **2.3.1 Objetivo de hardware**

- a. Realizar todas las modificaciones electromecánicas en la prensa necesarias para la correcta introducción de la misma al nuevo sistema.

##### **2.3.2 Objetivos de software**

- a. Realizar la correcta configuración de los elementos de campo.
- b. Programar el controlador para incorporar las variables del CCM.
- c. Programar las secuencias de control de todo el funcionamiento electromecánico de la prensa.

- d. Programar la terminal del operador para que sea compatible con la aplicación del CCM.

### **2.3.3 Objetivos de documentación**

- a. Modelar el comportamiento térmico de la prensa.
- b. Diseñar el control de la temperatura de la prensa.
- c. Elaborar los planos eléctricos preliminares de la máquina con la nueva configuración y elementos nuevos.

### **2.3.4 Objetivos de implementación**

- a. Realizar la correcta calibración de los elementos de campo.
- b. Instalar el nuevo gabinete de control.
- c. Instalar las cajas de paso que sean necesarias.
- d. Integrar a la prensa todos los sensores que sea necesario instalar para su control total.
- e. Realizar todo el cableado eléctrico desde los sensores y los actuadores hasta las cajas de paso y luego hasta el gabinete de control.
- f. Realizar la puesta en marcha del equipo con el nuevo sistema.

### Capítulo 3

#### Marco Teórico

---

El proceso de fabricación de llantas es extenso y complejo, sin embargo, se puede organizar de tal manera que cada segmento del proceso pueda ser controlado por separado y así mejorar la calidad en cada área respectiva, aplicando la filosofía japonesa de mejoramiento continuo **Kaizen**<sup>3</sup>[13].

Entendiendo esto, entonces se puede hablar de cada área por separado, teniendo así que la primera sección del proceso es la de pigmentos, donde se preparan todos los pigmentos que van para el Banbury, que es la máquina encargada del mezclado del caucho sintético, el caucho natural, los pigmentos y el negro de humo, todo para obtener el material del que se hacen las llantas, es decir, hule laminado.

Este hule laminado, es dirigido hacia tres etapas principales, las cuales son:

- **Tubuladoras:** es en esta sección en donde se prepara la banda de rodado, con diferentes espesores y tipos de hules preparados.
- **Calandras:** en estas máquinas es donde se impregna de hule a las telas utilizadas en las llantas, como delastomer, nylon, etc.
- **Steelastic:** en esta sección se forra de hule la capa de acero que lleva la llanta, la cual se utiliza para hacer la capa estabilizadora de la llanta.

Además de estas etapas, existe otra sección dedicada a la elaboración de las cejas de la llanta, en donde se recubre con hule el alambre que servirá de soporte para la llanta.

---

<sup>3</sup> Ver glosario en apéndice A.1

Una vez que todo esto está listo, todas estas partes se llevan a la sección de armado, en donde unen todas las etapas anteriores para obtener la llamada llanta verde, que ya cuenta con todas y cada una de las partes que tiene una llanta.

Por último, las llantas verdes son llevadas a la sección de vulcanizado, que es donde, mediante un proceso a base de presión y temperatura, la llanta se cura y queda el producto terminado que luego pasa a una sección llamada inspección final, donde se realiza una revisión exhaustiva del producto terminado. Todo este proceso se puede visualizar de manera más clara en el diagrama de la figura 3.1[8].

Es entonces de la etapa de vulcanizado, de la que se hará referencia a lo largo de este documento, ya que es a esta sección a la que pertenece el proyecto en cuestión.

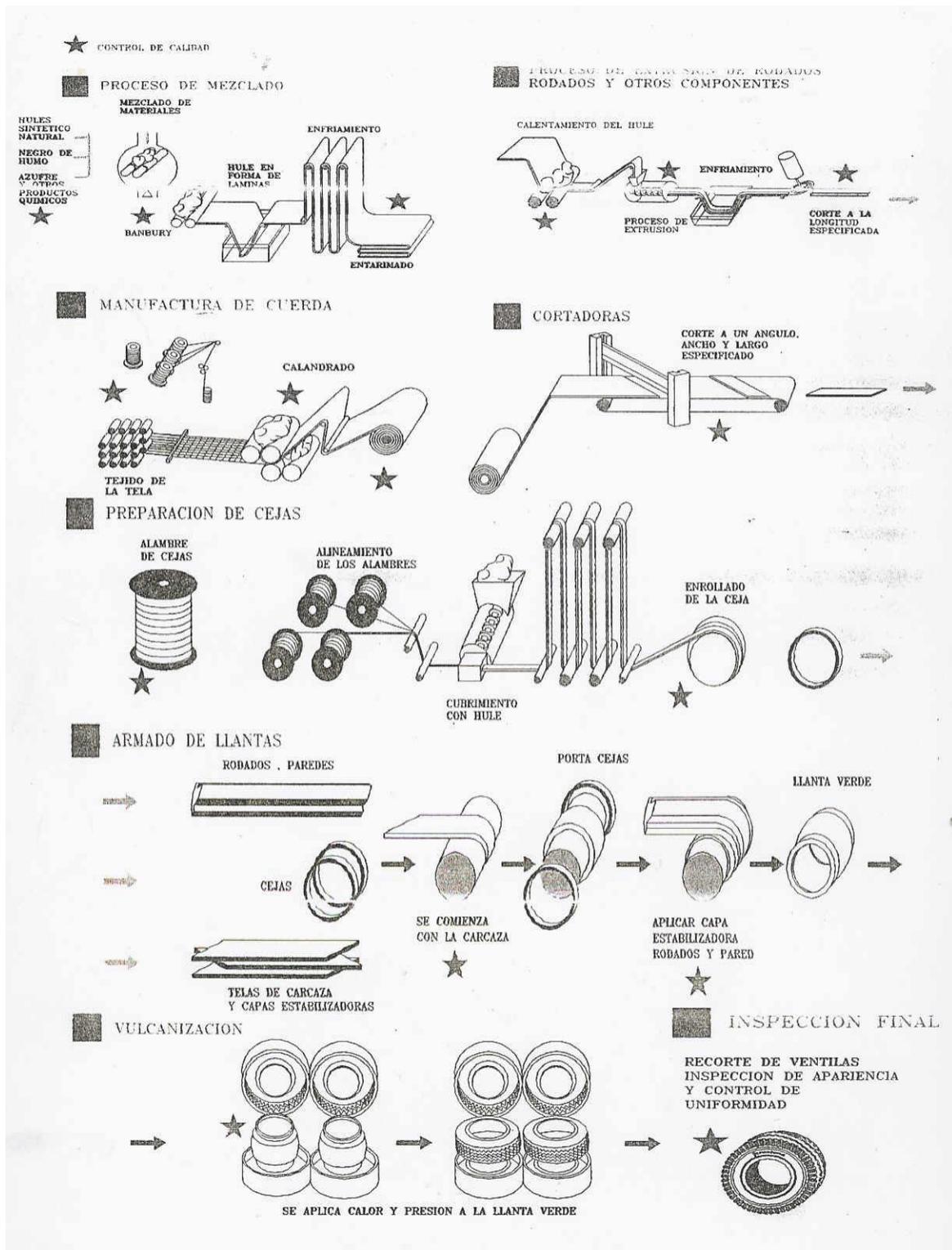


Figura 3.1 Proceso productivo de Bridgestone Firestone de Costa Rica S.A [8].

### **3.1 Descripción del sistema a mejorar**

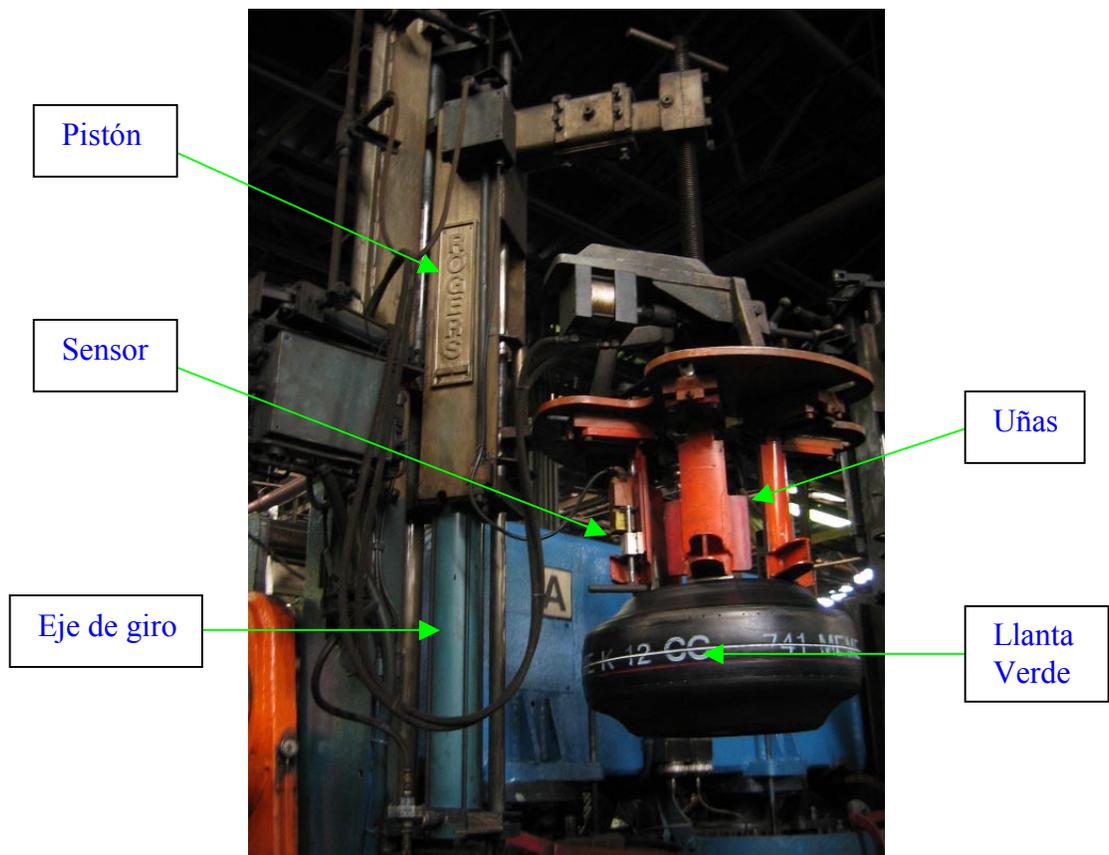
Como ya se explicó, la sección de vulcanizado es el cierre del proceso de fabricación de las llantas. A continuación se explicará el proceso concerniente al ciclo de trabajo de las prensas, al cual, se hace referencia en el diagrama de flujo de la figura 3.8.

Cuando la llanta llega a esta sección de vulcanizado, mediante lectores de códigos de barras se introduce a una base de datos el tipo de llanta que se está fabricando en una determinada prensa y la hora en la que se está haciendo, luego de la aprobación, el operario coloca la llanta en el banco de la prensa<sup>4</sup>, en donde, por medio de sensores de fin de carrera (microinterruptor), la máquina detecta que hay llanta y puede proceder a realizar el resto del proceso.

Cuando la prensa detecta que hay una llanta en el banco y si el selector está activado, los brazos que acarrear las llantas bajan hasta un determinado nivel. Estos se detienen mediante un sistema mecánico de levas. Los brazos también tienen un sensor para detectar la presencia de llanta, por lo que si éste se activa, las uñas de cada brazo se abren para recoger la llanta. Luego de abrir las uñas los brazos suben (figura 3.2).

---

<sup>4</sup> Ver glosario en apéndice A.1

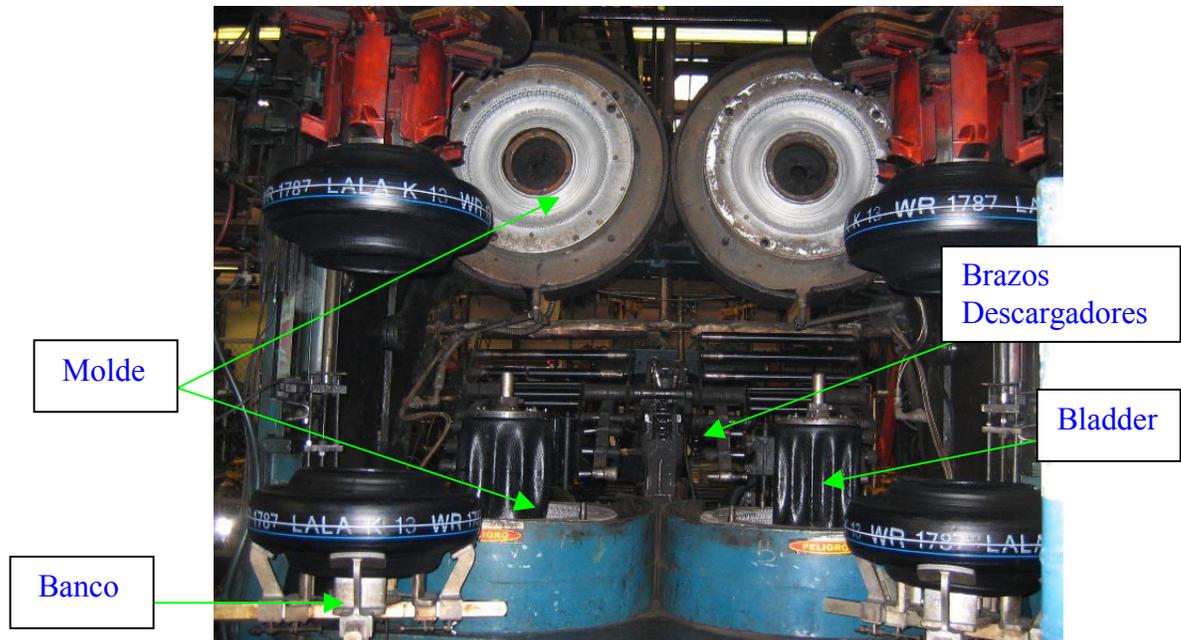


**Figura 3.2** Brazo acarreador de llanta verde

Una vez que las llantas están arriba, la prensa se abre, sube los bladders, posiciona los brazos descargadores debajo de donde debería estar la llanta recién curada (si la hay), luego los brazos descargadores se inclinan para que la llanta caiga al conveyor<sup>5</sup> de salida y cuando la o las llantas han pasado por un determinado punto, los brazos descargadores se devuelven hacia atrás hasta su posición habitual. Cuando la llanta ya salió de la prensa (si no fuera la primera carga), los brazos giran y bajan hasta el nivel del molde, luego los bladders se inflan hasta una presión determinada, la cual es controlada, si la máquina se encuentra en modo automático, por medio de interruptores de presión, que disparan las válvulas de aire, o bien, por medio de manómetros si se encuentra en modo manual. Cuando las válvulas se

<sup>5</sup> Ver glosario en apéndice A.1.

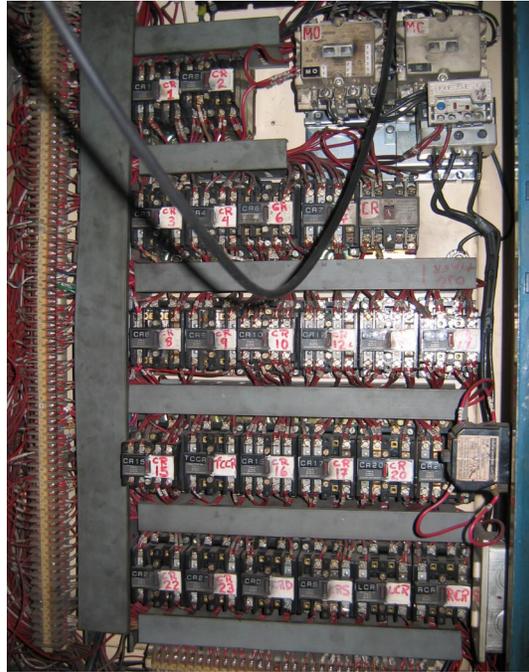
disparan, las uñas se cierran para liberar la llanta y dejarla en el molde. Este proceso se puede visualizar mejor con ayuda de la figura 3.3.



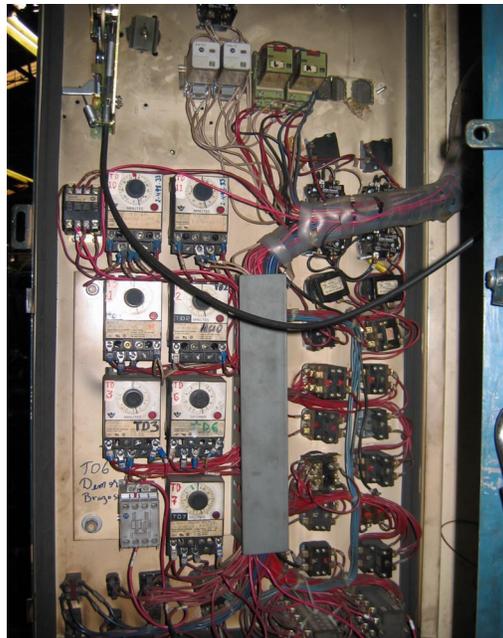
**Figura 3.3** Vista de la prensa abierta

Luego de esto, los brazos suben y vuelven a girar para que la prensa pueda cerrar y empezar el ciclo de curado de la(s) llanta(s). Al terminar el ciclo, la prensa abre y todo el proceso empieza nuevamente.

Es importante destacar, que todos los movimientos referentes a los brazos y la prensa, antes de la realización del presente proyecto eran activados por medio de levas y micro interruptores y que los controles de las válvulas de aire, vapor, los brazos descargadores y las uñas, se realizaban por medio de micro interruptores y enclaves (figuras 3.4 y 3.5), que disponían el funcionamiento de los cilindros y pistones hidráulicos. Además, debido a la falta de dispositivos de control, este pseudo control dependía de temporizadores, es decir, dependía de que los pasos anteriores se hayan realizado completamente, porque su único indicador para realizar la siguiente tarea, era el tiempo que hubiera transcurrido desde un determinado paso.



**Figura 3.4** Enclaves y contactores del antiguo control de la prensa



**Figura 3.5** Fondo de la puerta del antiguo gabinete de control

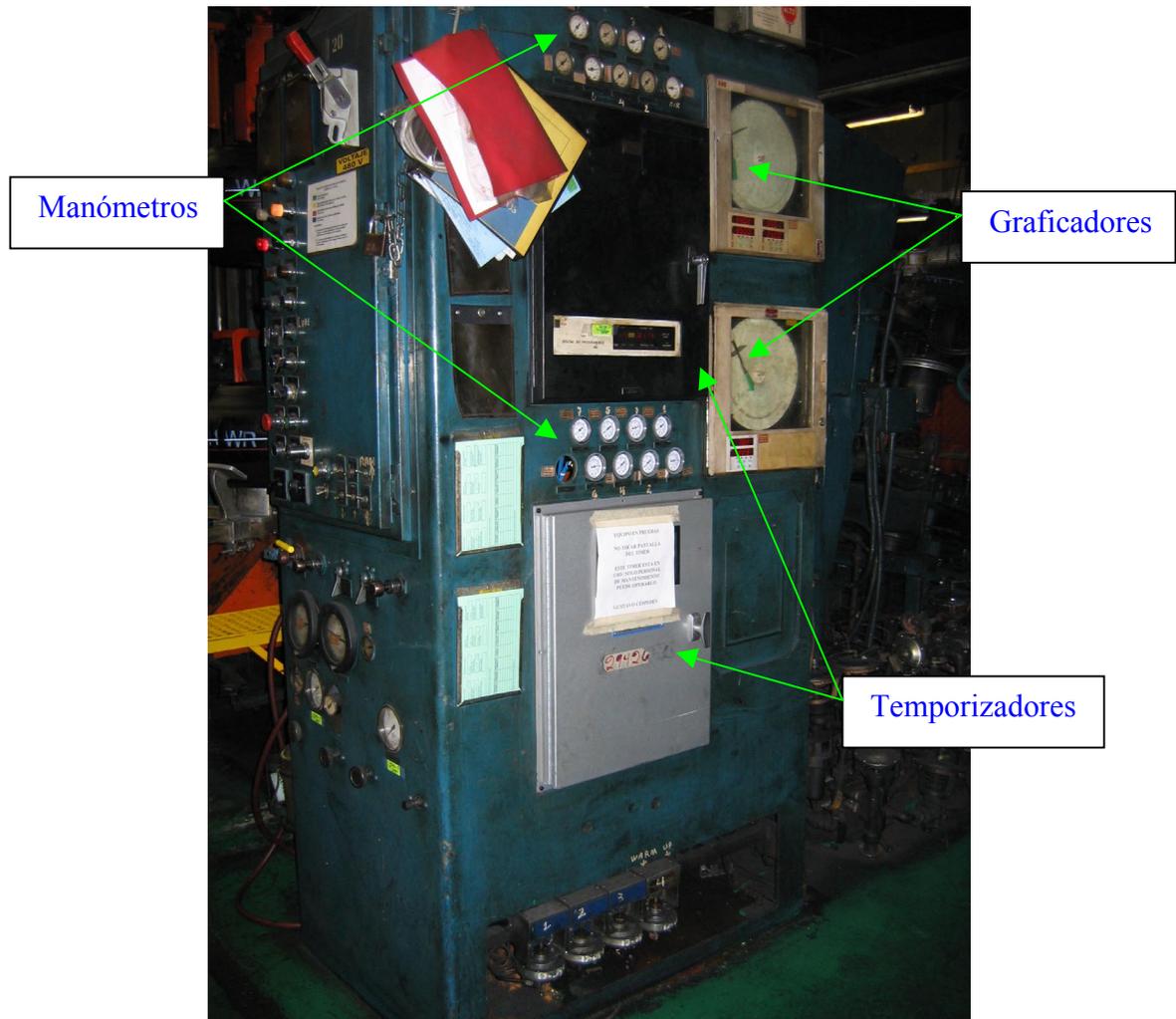
El control que existía para el operador y el resto del personal de la planta encargado de realizar las labores de mantenimiento de la prensa, era bastante limitado, ya que solamente contaba con algunos botones y selectores o interruptores para poder hacer que la prensa realizara todos los movimientos necesarios. El panel de control se observa en la figura 3.6



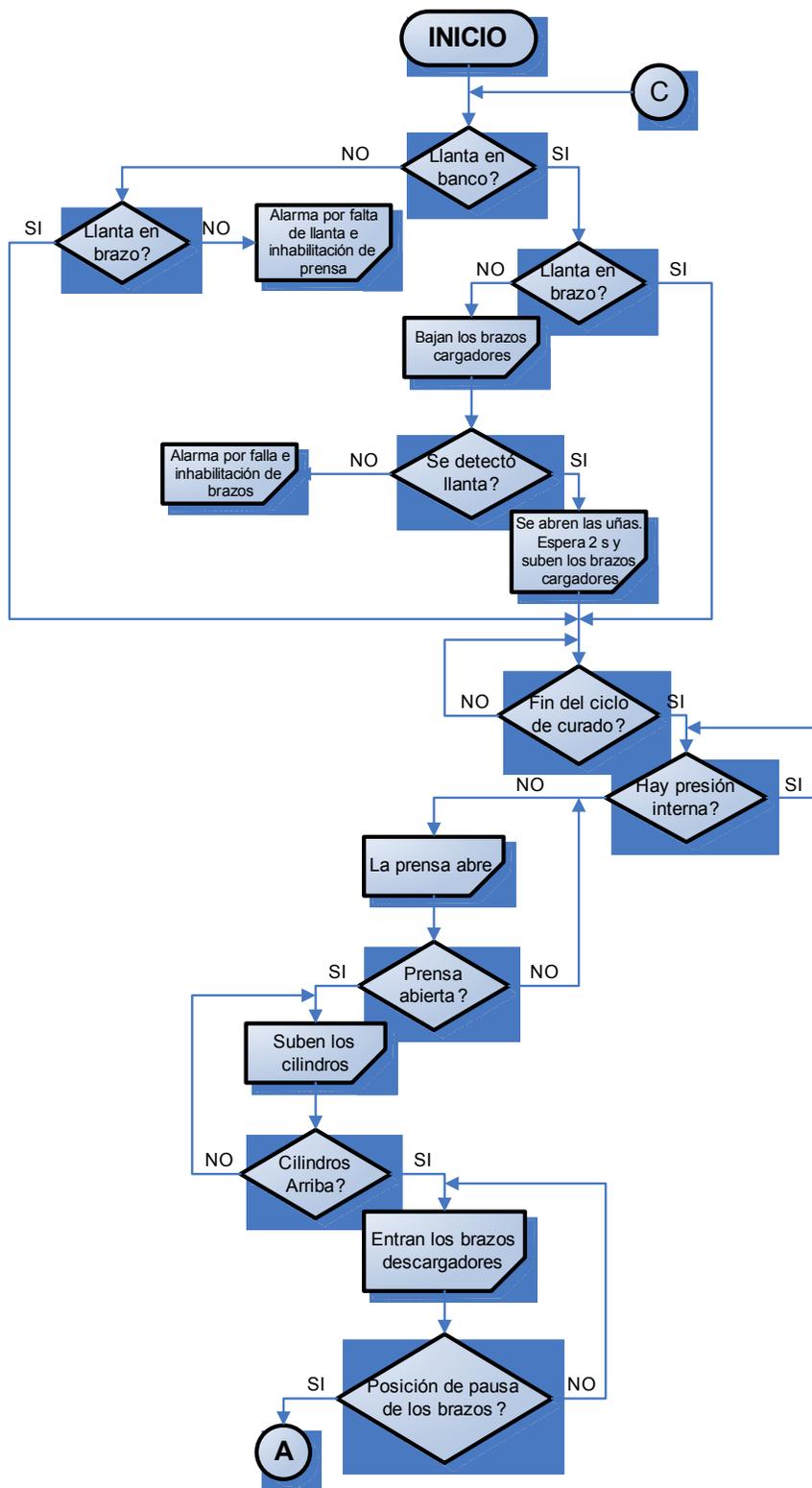
**Figura 3.6** Antiguo panel del operador

En cuanto a los aspectos de control del proceso, la situación también era bastante limitada, ya que únicamente contaban con los graficadores, múltiples manómetros y los temporizadores, que de todos modos, estaban solo para eso, verificación, no control del proceso. Estos elementos, además, se encontraban en una cara del panel que no era de acceso inmediato para el operador, es decir, estaban a un costado del

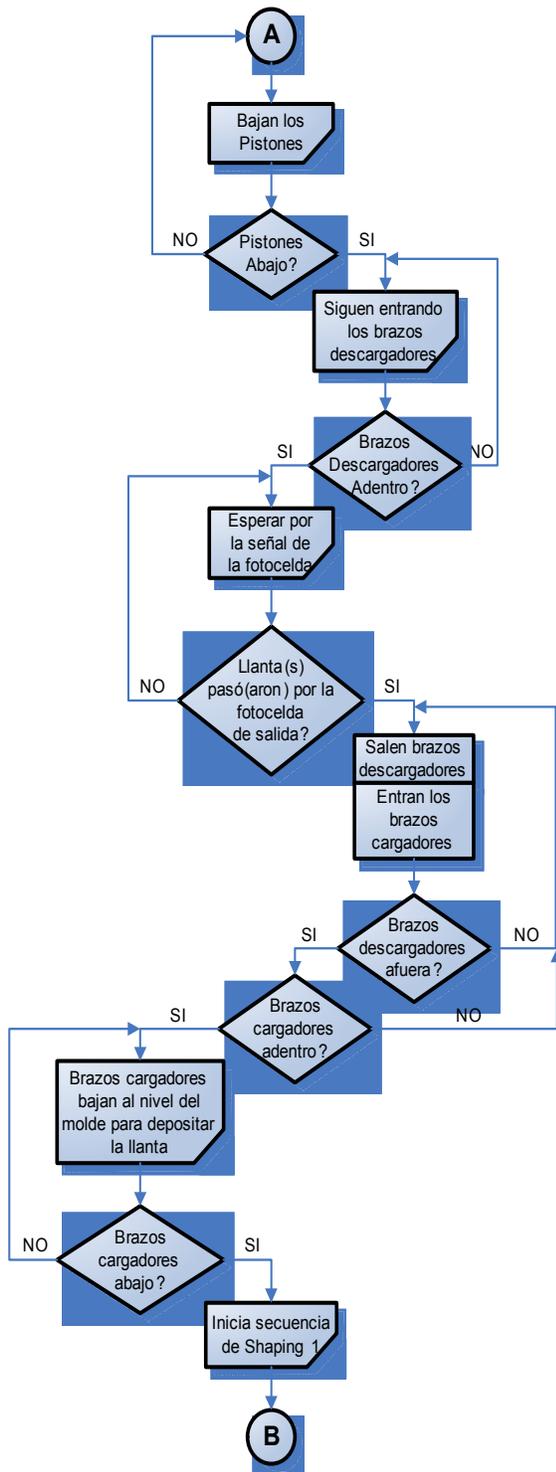
mismo, por lo que para poder estar al tanto de las diferentes presiones, tiempos y temperaturas, el operador, además de estar pendiente de que cada prensa esté trabajando correctamente y de que no les falte llanta, debía estar fijándose en estos elementos de monitoreo al costado de la máquina, como lo muestra la figura 3.7.



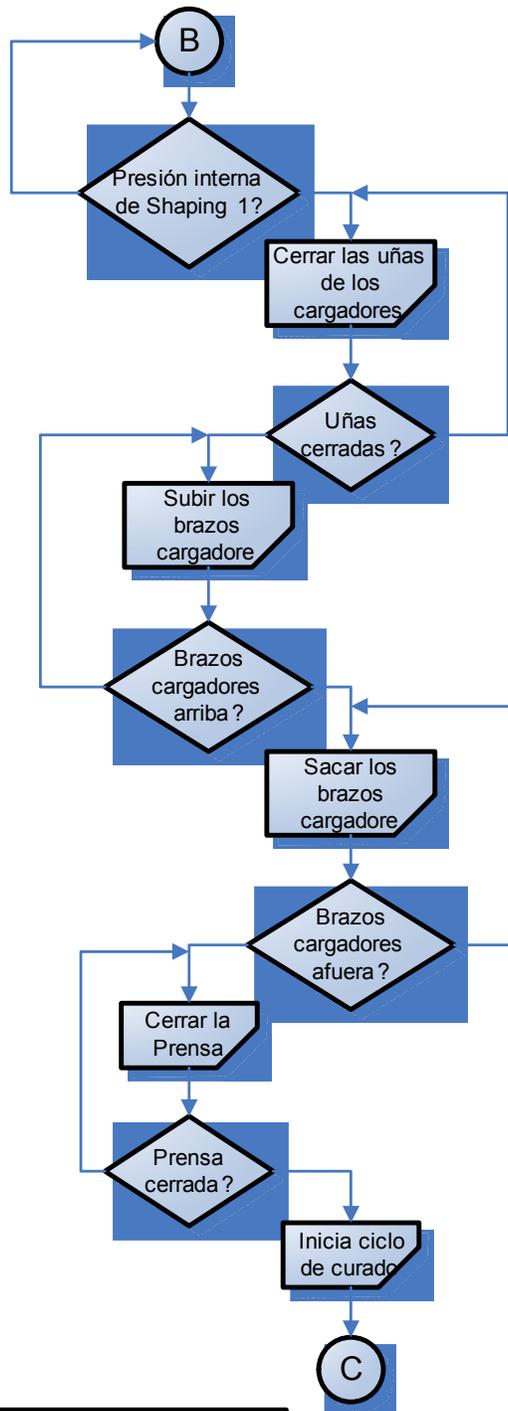
**Figura 3.7** Elementos de monitoreo de la prensa



**Figura 3.8** Diagrama de flujo de funcionamiento de la prensa vulcanizadora



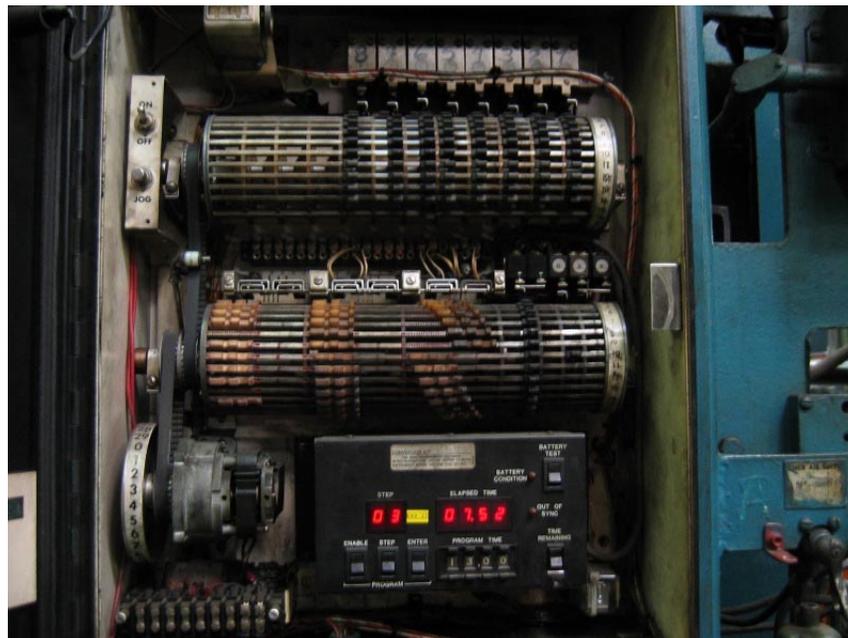
**Figura 3.8** Diagrama de flujo de funcionamiento de la prensa vulcanizadora (continuación)



**NOTA:** en este diagrama no se toman en cuenta las secuencias correspondientes al ciclo de curado, shaping 1 y 2 y otras referentes a las inhabilitaciones de la prensa por falla de temperatura (donde entra el controlador de temperatura desarrollado) o presión para evitar una alta complejidad y extensión en éste diagrama.

**Figura 3.8** Diagrama de flujo de funcionamiento de la prensa vulcanizadora (Continuación)

Para realizar el control del ciclo de curado, se tenía un sistema a base de levas y un temporizador analógico como el que se observa en la figura 3.9. Este temporizador, contaba con un tambor con contactos, que activaban o desactivaban diferentes válvulas por cada paso del ciclo. Cuando el tambor giraba, los diferentes contactos posicionados de una manera determinada para cada paso, se accionaban y las válvulas (que realmente son electro válvulas) se abrían o se cerraban según correspondía.



**Figura 3.9** Temporizador que controla las válvulas de la prensa

### 3.2 Descripción de los principales principios eléctricos de la solución

El principal trabajo de este proyecto se enfoca en el modelado y el diseño del control de temperatura de la prensa de vulcanizado, por lo que se puede pensar que los principales principios físicos y eléctricos que envuelven este problema, o por lo menos, los que saltan a simple vista, están orientados al control automático y toda la teoría envuelta por éste campo.

Por esta razón, es que se debe hacer uso de la toda teoría relacionada con aspectos de control automático, ya que por ejemplo, cuando se habla de modelado de una planta, necesariamente hay que hablar de variables de estado, linealización de sistemas, matrices de transición, ecuaciones de transición, funciones de transferencia, diagramas de diferentes tipos, entre otros.

#### 3.2.1 Funciones de transferencia

La forma clásica de modelar sistemas lineales y no lineales es utilizando funciones de transferencia para representar las relaciones entrada-salida entre variables y una manera de determinar estas funciones de transferencia, es empleando la respuesta al impulso, que se define como la salida obtenida en un sistema lineal cuando la entrada aplicada es la función impulso unitario  $\delta(t)$ . Tomando esto en cuenta, se dice que *la función de transferencia de un sistema lineal se define como la transformada de Laplace de la respuesta al impulso* [3].

Si la entrada se denota como  $u(t)$ , la salida  $y(t)$ , la función de transferencia como  $G(s)$  y la respuesta al escalón como  $g(t)$ , entonces la función de transferencia se define como:

$$G(s) = L[g(t)] \quad (3.1)$$

O bien

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (3.2)$$

Sin embargo, también se podría considerar que la relación entrada-salida de un sistema lineal invariante con el tiempo, se puede describir mediante la ecuación diferencial de  $n$ -ésimo orden con coeficientes reales constantes que se muestra a continuación:

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \quad (3.3)$$

Así, realizando la transformada de Laplace a ambos lados de la ecuación y reordenando, se obtiene la función de transferencia

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.4)$$

La definición de función de transferencia anterior, se puede ampliar con facilidad para sistemas con múltiples entradas y salidas, o sea, multivariable. En este tipo de sistemas, se puede utilizar una ecuación diferencial de la forma de la ecuación (3.3) para describir la relación entre un par entrada-salida cuando todas las demás entradas se hacen cero. Esto es válido debido a que el teorema de la superposición es válido para sistemas lineales.

En general, si un sistema lineal tiene  $p$  entradas y  $q$  salidas, la función de transferencia entre la  $j$ -ésima entrada y la  $i$ -ésima salida está definida como:

$$G_{ij}(s) = \frac{Y_i(s)}{R_j(s)} \quad (3.5)$$

Con  $R_k(s) = 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, p$ ,  $k \neq j$ . Esta ecuación muestra que solamente la  $j$ -ésima entrada está en acción mientras las otras son igualadas a cero, pero cuando todas las entradas están en acción, la transformada de la  $i$ -ésima salida, se describe como:

$$Y_i(s) = G_{i1}(s) \cdot R_1(s) + G_{i2}(s) \cdot R_2(s) + \dots + G_{ip}(s) \cdot R_p(s) \quad (3.6)$$

En forma matricial:

$$Y(s) = G(s) \cdot R(s) \quad (3.7)$$

### 3.2.2 Métodos gráficos para la solución

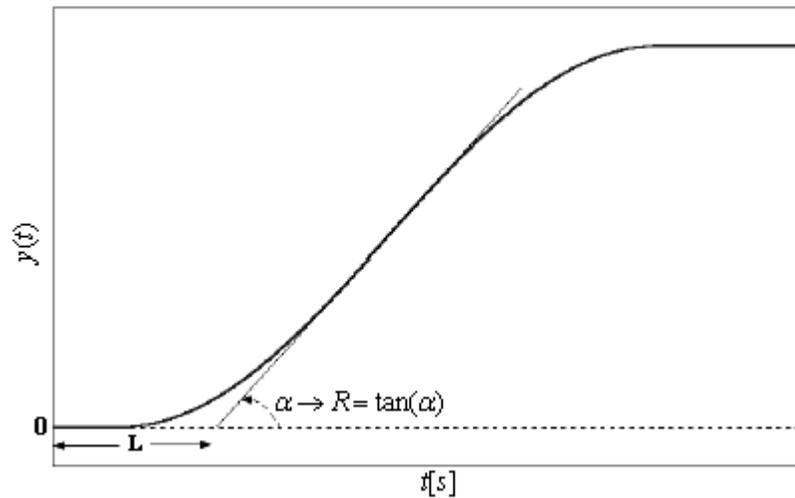
Existen métodos gráficos útiles para lograr obtener la solución de un determinado problema, que además facilitan el proceso de diseño del controlador.

Entre estos métodos gráficos se pueden citar los diagramas de flujo de señales, los cuales además se complementan con el llamado método de Mazón, diagramas de bloques y el álgebra de bloques, el lugar geométrico de las raíces, entre otros.

También existen métodos gráficos para obtener, ya sea la ecuación característica de la planta, o bien, el controlador PID, en ambos casos a partir de la curva de comportamiento de la planta ante un escalón. Tal es el caso de los métodos utilizados en este proyecto que son explicados en otras secciones más adelante. Estos métodos son utilizados en el campo del control automático de procesos.

Uno de los métodos más conocidos para el diseño de controladores PID es el de Ziegler y Nichols (1942), el cual fue deducido a partir de criterios de optimización [6]. Ziegler y Nichols plantearon básicamente dos conjuntos de reglas. El primero de ellos es la aplicación de procesos cuya respuesta temporal al escalón tiene forma de "S" (figura 3.10). Si el proceso a controlar tiene una respuesta al escalón como la indicada en la figura 3.10, se calcula la pendiente  $R$  en el punto de inflexión y la

intersección de una recta (tangente) con esa pendiente y el eje temporal determina el retardo equivalente  $L$ . Así, los parámetros  $R$  y  $L$  permiten definir la constante de tiempo y el retardo de un sistema equivalente de primer orden con retardo [6].



**Figura 3.10** Determinación de las constantes  $R$  y  $L$  [6]

A partir de los parámetros  $R$  y  $L$ , Ziegler y Nichols [6] recomiendan la utilización de los siguientes valores para el cálculo del PID:

$$K_p = \frac{1.2}{R \cdot L} \quad (3.8)$$

$$T_i = 2L \quad (3.9)$$

$$T_d = 0.5L \quad (3.10)$$

El segundo conjunto de reglas conocido como “de ciclo límite” [6] se basa en la información obtenida a partir de condiciones límites de estabilidad del proceso en lazo cerrado empleando un controlador proporcional puro. De este segundo conjunto de reglas no se hará más referencia.

### 3.2.3 Sistemas de control

Es claro, que todos los aspectos citados anteriormente en esta sección, son parte de todo un proceso que tiene como objetivo la elaboración de un diseño de un sistema de control, el cual necesita de todo el análisis que se logra llevando a cabo todas las técnicas expuestas y que, algunas veces involucran un análisis en el dominio del tiempo y otras tantas en el dominio de la frecuencia.

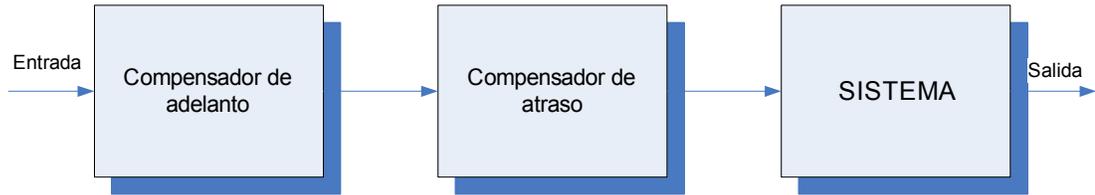
Uno de los controladores más ampliamente utilizados en todos los esquemas de compensación, es el controlador PID, el cual aplica al proceso una señal que combina de una manera proporcional, integrativa y derivativa, las señales de actuación propias del sistema. Este controlador, comúnmente se diseña en el dominio del tiempo, debido a que los componentes antes mencionados se pueden visualizar con facilidad.

La función de transferencia de un regulador PID es básicamente la suma de tres términos, cada uno con su respectiva constante de error, entiéndase, el error, la velocidad de cambio del error y la “historia” del error ( $K_p$ ,  $K_v$ ,  $K_a$ ). Básicamente, *la acción del regulador PID hará que sobre la planta actúe una señal  $u(t)$  compuesta por una señal proporcional al error, una señal proporcional a la integral del error y una señal proporcional a la derivada del error* [4], tal como se aprecia en la ecuación 3.11. Así, con un controlador PID, se puede añadir amortiguamiento a un sistema, a la vez que mejora la estabilidad relativa y el error en estado permanente, pero sin incrementar demasiado el tiempo de levantamiento de la respuesta en estado transitorio.

$$u(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + k_D \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.11)$$

De esta manera, es como se llega a la conclusión de que este tipo de compensador se puede tomar, en forma práctica, como la conexión en serie o cascada de dos diferentes compensadores, uno de adelanto y el otro de atraso con la particularidad

de que posee el polo en el origen. Esta configuración se representa de manera simbólica en el diagrama de la figura 3.11.

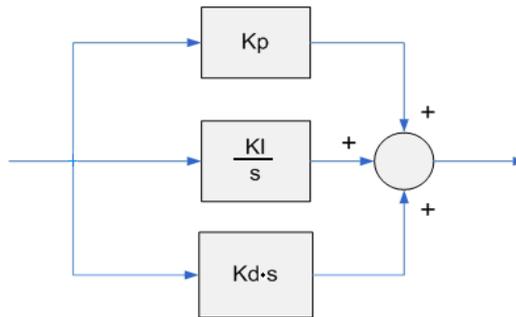


**Figura 3.11** Diagrama de bloques de un compensador PID práctico

De todo esto, se puede obtener la función de transferencia de este regulador, que como se mencionó anteriormente, consiste en la suma de tres diferentes elementos y se muestra en la ecuación 3.12.

$$PID = K(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_D \cdot s \quad (3.12)$$

Este comportamiento se muestra en el esquema de la figura 3.12.



**Figura 3.12** Esquema del regulador PID

#### **4.1 Reconocimiento y definición del problema**

Para lograr obtener una solución que cumpliera con todos los requerimientos establecidos por la empresa, explicados en la sección 1.2, fue necesario tener un conocimiento del problema concreto para plantear la solución. Para entender del problema existente, básicamente se contó con entrevistas con el ingeniero encargado del área al que pertenece la prensa, así como repetidas visitas con el propósito de ver, estudiar y analizar el funcionamiento de la prensa. Aproximadamente el 70% de estas visitas, se realizaron en presencia de al menos un técnico especialista en el área, ya que ellos son los que conocen las prensas de una manera más completa. Por esta razón es que los técnicos, con sus opiniones y recomendaciones, tuvieron un aporte para la realización del proyecto.

## 4.2 Obtención y análisis de información

Como primer paso, antes de analizar cualquier posible solución a éste problema, fue el conocimiento del proceso o funcionamiento total de la prensa, pues según lo obtenido de una entrevista con un técnico eléctrico del área, estas prensas son tan antiguas que los planos existentes, tanto mecánicos como eléctricos, son dudosos en el sentido de que en estos momentos, no se sabe a ciencia cierta, si todos los elementos presentes en esos planos existen o funcionan como dicen los planos.

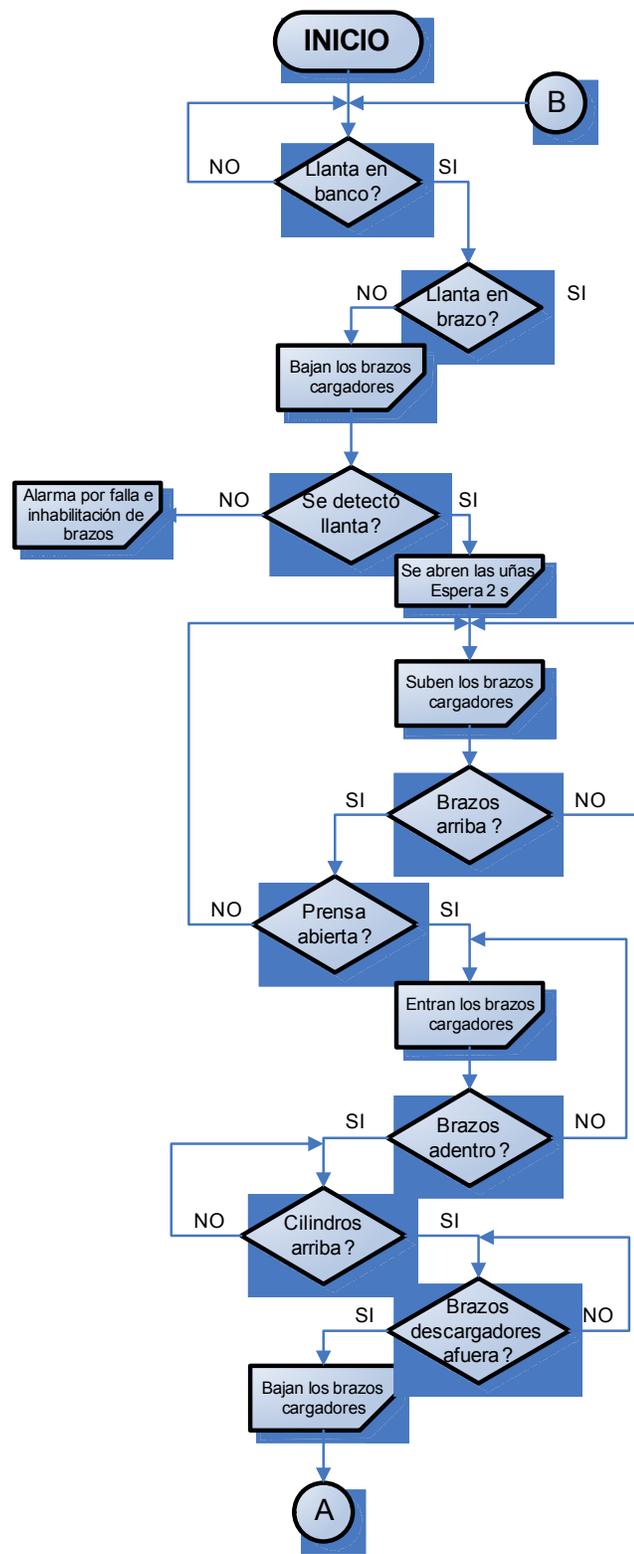
En este caso, el principal problema, es la distribución de válvulas y tuberías relacionadas con el calentamiento del platten<sup>6</sup>, ya que debido a la antigüedad de la prensa, se le han tenido que realizar diferentes trabajos e incluso modificaciones, por lo que al respecto se cuenta únicamente con la información brindada por los mecánicos y eléctricos más antiguos de la división. Sin embargo, estos cambios en las distribuciones neumáticas y eléctricas, también afectan, como es de esperar, el funcionamiento total de la prensa, por lo que era necesario tener claro la relación que existe entre movimientos y posiciones mecánicas, señales eléctricas y accionamientos neumáticos, para evitar alguna clase de accidente o mal funcionamiento cuando se hiciera la puesta en marcha.

Para tal fin, se procedió a realizar un análisis y tomar nota de cada movimiento y accionamiento que realizara la prensa. Para un mejor entendimiento se estudiaron por separado los movimientos y funcionamiento de los brazos cargadores, los brazos descargadores y la prensa. Así fue posible desarrollar el diagrama de flujo correspondiente al funcionamiento de la prensa que se muestra en la figura 3.8, en donde se logró combinar, de un modo general, las tres diferentes secuencias.

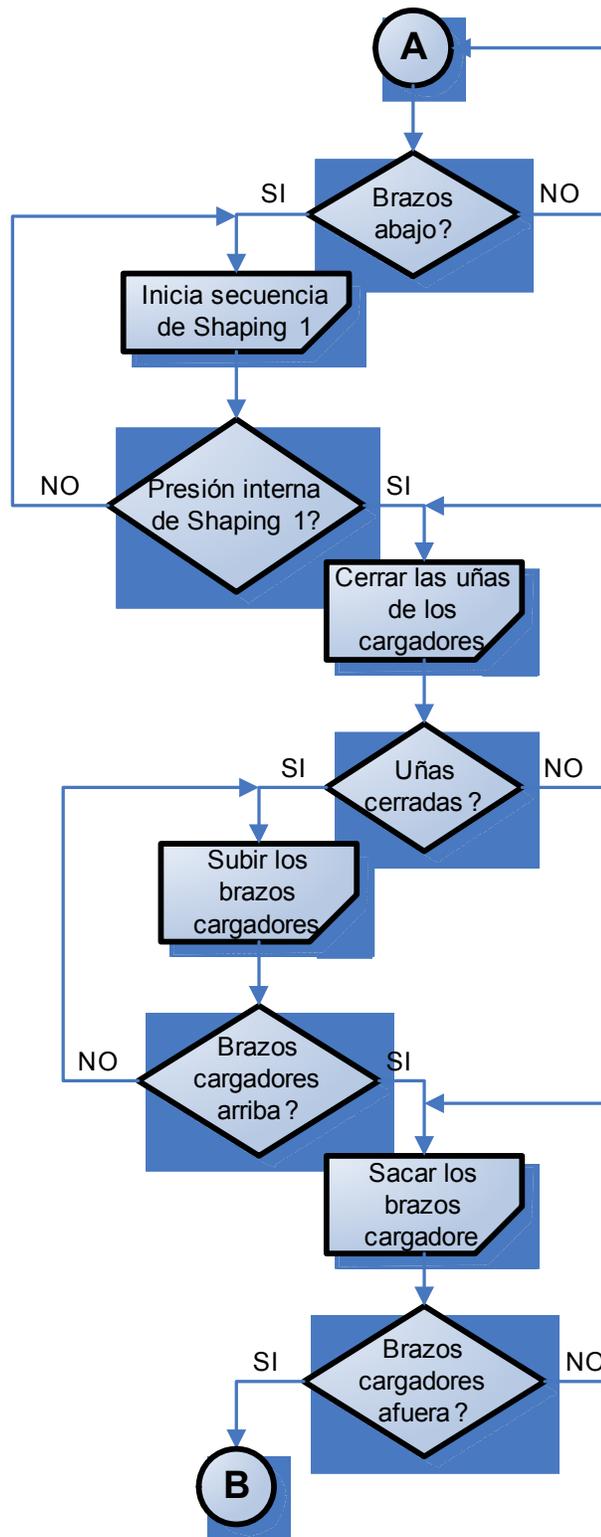
Para una mayor claridad, los diagramas de flujo de los brazos cargadores y descargadores se muestran en las figuras 4.1 y 4.2 respectivamente.

---

<sup>6</sup> Ver glosario en apéndice A.1



**Figura 4.1** Diagrama de flujo del funcionamiento de los brazos cargadores



**Figura 4.1** Diagrama de flujo del funcionamiento de los brazos cargadores (Continuación)

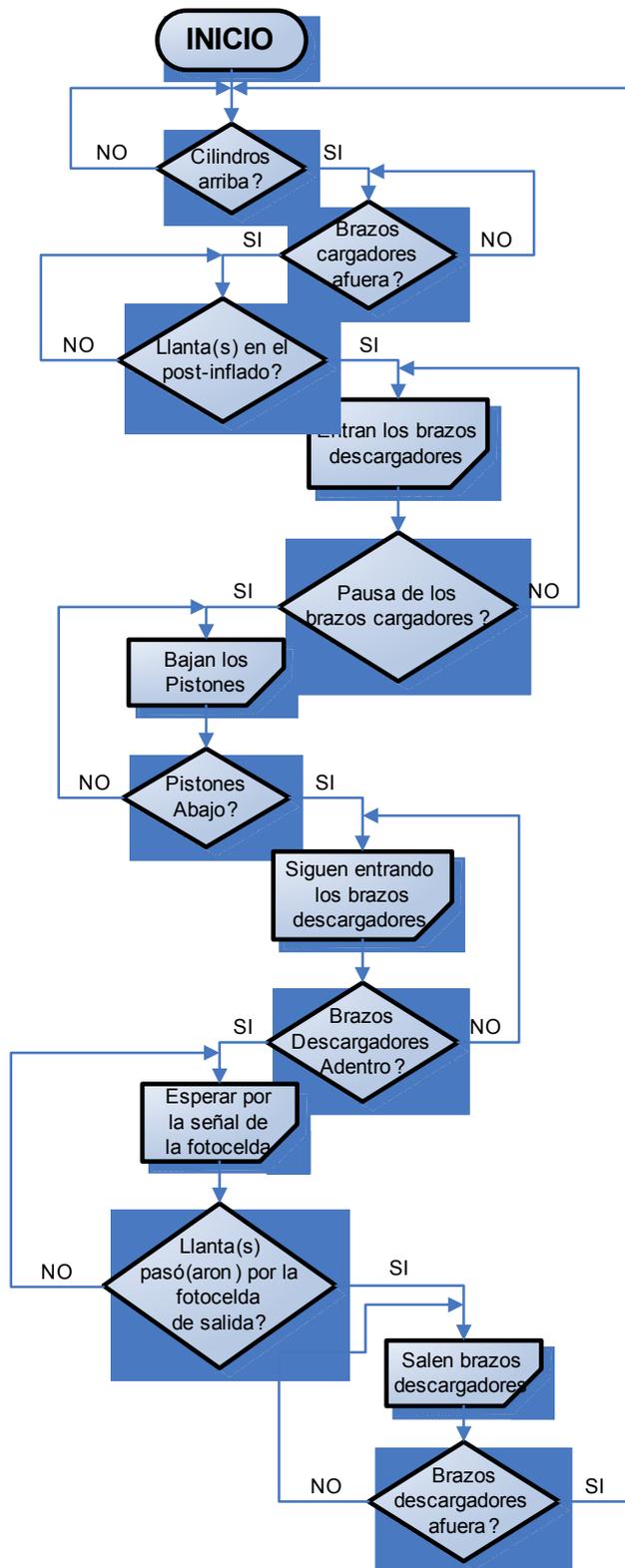


Figura 4.2 Diagrama de flujo del funcionamiento de los brazos descargadores

### 4.3 Evaluación de alternativas y síntesis de la solución

Por el tipo de control que se debía realizar, tomando en cuenta tanto el control de temperatura como el control total de la prensa, era claramente necesario elaborar el control con un dispositivo que centralizara todas las funciones y que fuera lo suficientemente moderno para realizar dicho control. Para esto se plantearon tres posibles soluciones: la utilización de un microcontrolador, un FieldPoint de National Instruments® o un Controlador Lógico Programable o PLC.

**El microcontrolador**, permite una programación mucho más flexible, la posibilidad de ampliar la memoria del dispositivo de una manera rápida y sencilla y además tiene una gran versatilidad para diferentes y numerosas aplicaciones, debido a los elementos que ya están integrados en el mismo, como ADC (Convertidor Analógico/Digital) de ocho o más canales de 10 bits, múltiples entradas/salidas digitales, ALU (Unidad Lógica y Aritmética), PWM (Modulador de Ancho de Pulso), USART (Receptor/Transmisor Asíncrono Universal), comparadores, memoria FLASH tipo CMOS basada en 8 bits, etc. Estos dispositivos se presentan en dos tipos de encapsulados, ya sea tipo DIP de 18 pines o de montaje superficial. Operan con una frecuencia máxima de 10 MHz (supleada por un cristal), cuentan con 13 pines de entradas/salidas y operan con una tensión entre los 2 y 6  $V_{CD}$ .

La temperatura que pueden soportar (según la casa fabricante y la familia a la que pertenezcan) oscila entre los  $-65^{\circ} C$  y los  $150^{\circ} C$ . Estos dispositivos son vulnerables a los ambientes ruidosos y a la vibración, además de que no es adecuado para trabajar en ambientes muy sucios.

Al analizar los aspectos de estas condiciones, se determinó que la utilización de un equipo no diseñado para condiciones extremas no era viable, además de que la corriente de salida de las patillas de salida del microcontrolador, oscila entre los 20 y 25 mA, la cual no es suficiente para la activación de cualquier tipo de válvula, por lo que se haría necesario diseñar un circuito externo para amplificar la corriente y así

poder utilizar este dispositivo, lo cual repercute directamente en aspectos de espacio y cuidados que se deben tomar. La documentación encontrada tanto en Internet como en manuales técnicos, fue la herramienta primordial para desechar la idea de la utilización de éste tipo de equipo.

Los dispositivos **FieldPoint®** de **National Instruments®** tienen una gran versatilidad y alcance, en lo que a medición y control de sistemas y procesos se refiere (Figura 4.3). Estos tienen un aislamiento para 2300 V<sub>RMS</sub>, un rango de tolerancia de temperatura desde los -40°C hasta los 70° C y tiene la facilidad de que su montaje, al igual que con un PLC, se realiza por medio de rieles, tiene numerosos módulos de entrada y salida además de capacidad de conexión por medio de tecnología Ethernet de 10 y 100 Mbs. El FieldPoint, a diferencia del microcontrolador, tiene una tolerancia de 5 g de vibración e inmunidad al ruido eléctrico, lo que es indispensable por el tipo de utilización que se pretende.



**Figura 4.3** FieldPoint de National Instruments

Sin embargo, a pesar de que el FieldPoint supera todas las expectativas para ser utilizado en el proyecto, se determinó que su precio era muy elevado, por lo que se descartó su compra y la de la herramienta de software LabView®, necesaria para la programación de estos equipos.

Otro punto que fue planteado en conjunto por el ingeniero asesor y un técnico del área, fue el tipo de programación requerida por estos dispositivos, ya que en un futuro, de existir algún fallo o problema en la máquina, se necesitaría de un ingeniero con los conocimientos especializados en este tipo de estructura y lenguaje de programación (situación que también se presenta con el microcontrolador), contrario a lo que ocurriría con un PLC, ya que éste último es de uso común en la industria. Otro factor determinante para la elección de la solución, fue la rapidez de implementación, ya que por el tipo de equipo utilizado, con estructuras robustas y resistentes a las condiciones extremas de una planta como la de fabricación de llantas, se facilitaría la instalación de todo el equipo para el nuevo sistema, recordando que una limitante de en el desarrollo del proyecto, era el tiempo durante el cual había que tener la máquina detenida, debido a que el departamento de producción, exigía que sea el mínimo tiempo posible, desde que se detuviera la máquina hasta que se pusiera nuevamente en producción normal.

Con el **Controlador Lógico Programable** o **PLC**, se tienen muchas ventajas según el dispositivo a escoger. Por razones corporativas, como se explicó anteriormente, se deben utilizar PLC's marca Allen Bradley® de Rockwell Automation®, más específicamente, el CPU del PLC debe ser modelo SLC 5/05 de la Serie C. Estos con conector RJ-45 para permitir comunicación vía Ethernet a 10/100 Megabits Full Duplex o Half Duplex según se requiera, 64K de memoria adicional para un total de 64 conexiones. Este PLC es modular, por lo que se puede realizar su montaje en Rack's de 5, 7, 10, 13 ó 15 slots, además se pueden conectar varios racks entre sí según sea necesario. En cada slot de los racks se conectan módulos de entradas o salidas discretas (16 por módulo), analógicas (4, 8 ó 16) o módulos con funciones especiales como por ejemplo el módulo de entradas rápidas para el encoder; estos módulos por lo general, se deben configurar por software. Este dispositivo puede manejar un máximo de 4096 entradas más 4096 salidas a la vez.

Estos PLC's cuentan con numerosos contadores y temporizadores con una resolución de hasta 1 ms, son inmunes al ruido eléctrico, son altamente robustos

físicamente hablando, tienen una resistencia a la vibración por encima de los 60 Hz, pueden trabajar a temperaturas mayores a los 60° C y permiten una humedad de hasta un 90% sin condensación.

Un aspecto adicional y de gran importancia para la empresa, es el costo del PLC, ya que debido a que la corporación tiene un acuerdo comercial con Rockwell Automation®, esta empresa dedicada a la fabricación de equipo de automatización le hace un 40% de descuento a Bridgestone Firestone Corp., por lo que el precio de este equipo disminuye considerablemente.

En la tabla 4.1 se pueden apreciar los aspectos más importantes que se tomaron en cuenta a la hora de decidir la utilización de uno u otro equipo de los ya expuestos, con el fin de ser utilizado en el presente proyecto:

**Tabla 4.1** Comparación de posibles equipos a utilizar en el proyecto

Equipo	Capacidad de Entradas/Salidas	Tolerancia Térmica (°C)	Tolerancia al Ruido Eléctrico (V <sub>RMS</sub> )	Tolerancia a Ambientes Sucios	Puertos en Conexión	Precio (\$)
Microcontrolador	8/8	-65 a 150	0	NO	1	10 - 15
FieldPoint	3200/3200	-40 a 70	2300	SI	2	15000 – 16000
PLC	4096/4096	-25 a 60	2100	SI	2	8000 - 9000

Es importante destacar que el FieldPoint tiene muchas otras características más, pero no necesariamente son de utilidad para la elaboración de este proyecto, ya que el control mecánico necesario, si bien es algo extenso, tampoco es altamente complicado una vez que se entiende la secuencia total de la máquina; con respecto a la comunicación del dispositivo, como ya se vio, el PLC SLC 5/05 tiene capacidad de comunicación vía Ethernet, además de RS232 serial, ControlNet®, DeviceNet®, DH+® y DH-485®, por lo que se refiere a este sentido queda más que cubierto. Por último, la capacidad de manejo de sistemas complejos como un controlador PID, si bien el FieldPoint está en plena capacidad de manejar e implementar el más

complejo de los PID debido a la fortísima base matemática del software LabView®, el software utilizado para programar éste PLC, el RSLogix 500®, está en la capacidad de manejar un PID como el requerido en este proyecto.

#### **4.4 Implementación de la solución**

Como todo proyecto de ingeniería, la primera etapa de ejecución, entendiendo que ya toda la investigación previa se ha realizado, fue de diseño. Así, se trabajó en primer lugar en el diseño de las subrutinas encargadas de movimientos específicos de la prensa, así como operaciones internas de la misma, es decir, las subrutinas de la lógica de los movimientos de los brazos cargadores y descargadores, los cuales se elaboraron utilizando una secuencia de pasos, con el fin de que la búsqueda de errores o fallas en el sistema a la hora de realizar la puesta en marcha, fuera lo más fácil y puntual posible, para así ahorrar tiempo de pruebas.

La introducción de la prensa al sistema de monitoreo CCM, debía cumplir con numerosos requisitos de forma y desempeño, por lo que la adaptación de todos estos factores al proyecto era indispensable.

En el transcurso de la implementación, eran necesarias varias pruebas de campo, sin embargo, debido a la situación ya expuesta con respecto al paro de la máquina, se debieron realizar simulaciones remotas, es decir, con equipo no instalado en la máquina. Estas simulaciones fueron necesarias únicamente para las pruebas del software y antes de la puesta en marcha.

Estas pruebas remotas o simulaciones, tenían el particular requisito de que no se podían realizar hasta que el programa del PLC estuviera completamente terminado, esto por la simple razón de que la comunicación con el servidor Satellite del CCM es bastante compleja y no puede realizarse por etapas, es decir, el sistema necesita de todos y cada uno de los componentes para lograr la comunicación.

Es entonces cuando, una vez terminado el programa del PLC, empiezan las pruebas. Para esto se instaló un PLC del mismo tipo y modelo al que se iba a utilizar en la máquina y se le descargó el programa; es importante destacar que estas pruebas eran básicamente de comunicación con el CCM y todo lo referente a descarga de

parámetros, recetas y monitoreo, por lo que lo relacionado a entradas y salidas del sistema, no era necesario.

Dichas pruebas consistieron en “introducir” la prensa 20 al CCM, trabajo realizado por el ingeniero asesor debido a su alta complejidad y gran número de pasos, además de que, aunque es un proceso en cierta forma repetitivo en el sentido de que para todas las prensas el procedimiento es el mismo, es bastante delicado, pues si se comete un error en alguno de los pasos, puede repercutir en un error del sistema completo o se puede afectar alguna de las prensas ya introducidas al sistema, provocando pérdidas en producción bastante significativas. Para la introducción de la prensa al CCM, fue necesario conectar el PLC a la red del sistema, al igual que la pantalla de tacto, que también se utilizó una idéntica a la que se iba a utilizar en campo. Esto se hizo por medio de un hub pequeño de 8 puertos, en donde además, se conectó la computadora utilizada para protocolar y/o observar el programa y su comportamiento en el sistema.

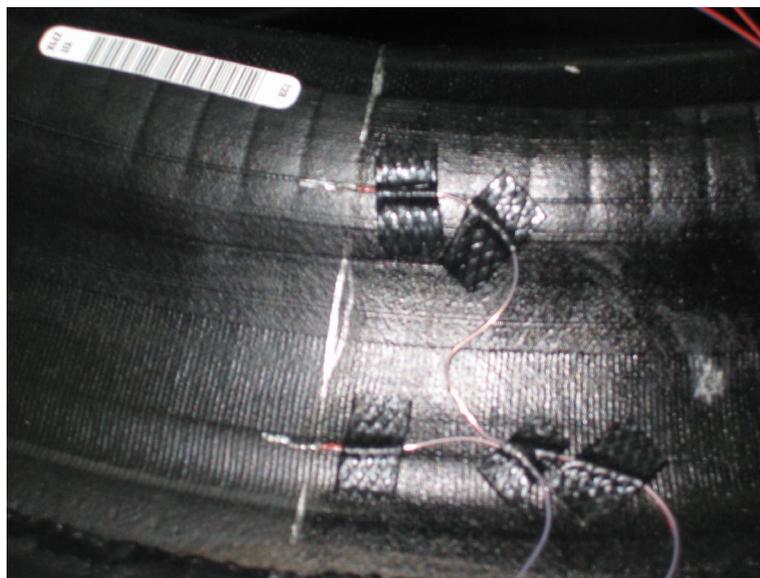
Una vez realizada toda la conexión necesaria, se procedió a simular situaciones mecánicas de la prensa, utilizando registros y bits para dicho fin. Con estas situaciones simuladas, fue posible comprobar que la comunicación fuera efectiva entre el programa del PLC, el programa de la pantalla (que también se debía comunicar con el CCM y con el PLC) y el programa del servidor del CCM en donde se encuentran todas las bases de datos. Así entonces, se logró descargar recetas, parámetros, obtener gráficas de curado (curados simulados) y todos los aspectos que se debían verificar antes de poner en marcha la prensa con el sistema.

En paralelo con la elaboración del programa, se empezó a trabajar en el diseño del control de temperatura, lo cual se hizo con un modelado del sistema. Sin embargo, al cabo de mucho trabajo y pocos resultados, se procedió a desechar la opción de un modelado teórico-matemático y se inició una nueva etapa de investigación en busca de formas alternativas de realizar un control automático. Es así como se llega a la conclusión, de que en materia de control automático de procesos, la mejor opción es

la utilización de métodos experimentales para la obtención de parámetros de manera experimental.

Una vez seleccionado un método para tal fin, se procedió a realizar pruebas experimentales que eran necesarias para que los datos obtenidos tuvieran validez. Estas pruebas consistían en verificar que las temperaturas a controlar de los dos moldes estuvieran considerablemente parecidas, porque de lo contrario sería necesario realizar un controlador diferente para cada molde, lo que incrementaría la utilización de tiempo y recursos. Para la realización de estas pruebas, el departamento de laboratorio accedió a facilitar un equipo que utilizan para realizar una prueba bastante similar.

La prueba consistió en tomar dos llantas de la medida correcta, es decir, de la misma medida que tiene el molde utilizado en la prensa al momento de la prueba, adaptarles una serie de termocuplas en diferentes posiciones y vulcanizar la llanta mientras se monitorean las temperaturas en los diferentes puntos de la llanta. La distribución y colocación de las termocuplas en la llanta verde, puede apreciarse en la figura 4.4, 4.5 y 4.6.



**Figura 4.4** Colocación de termocuplas en la llanta

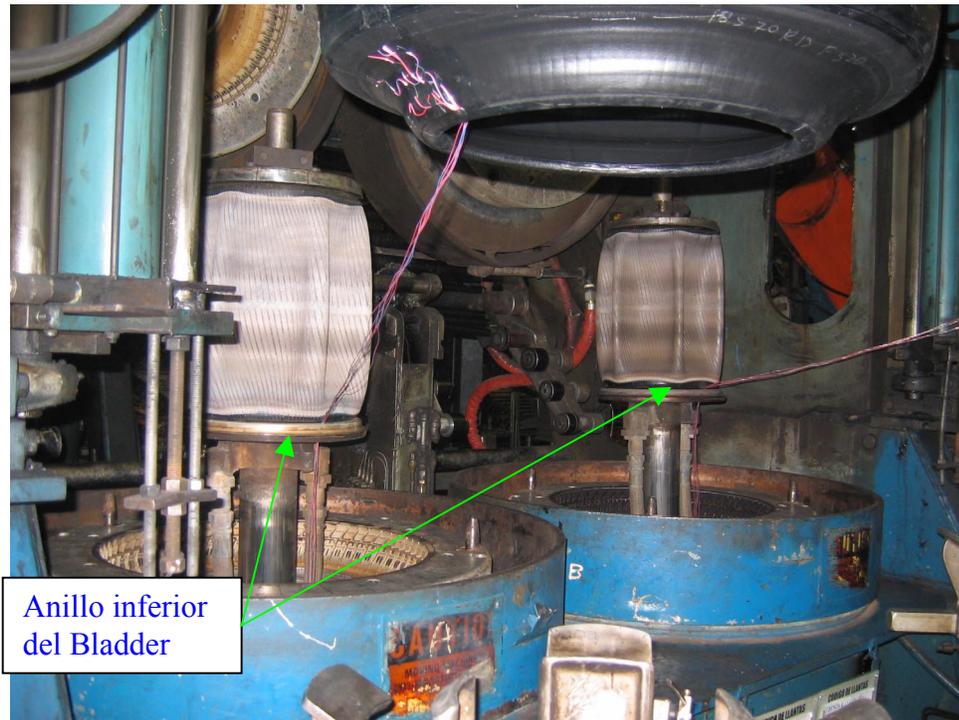


**Figura 4.5** Distribución lateral inferior de las termocuplas



**Figura 4.6** Distribución lateral superior de las termocuplas

Una vez que las termocupas estaban colocadas en las llantas, se procedió a perforar el anillo inferior del bladder para pasar los cables de las termocupas y que no se dañaran con el calor del proceso de vulcanizado. Esto se puede apreciar en la figura 4.7.



**Figura 4.7** Paso de los cables de las termocupas por el anillo inferior del bladder

Luego de que todo el equipo estaba instalado y listo, se procedió a vulcanizar las llantas con un ciclo normal según la medida de la llanta. Al terminar de vulcanizarlas simplemente se cortan los cables y se desechan, puesto que las termocupas quedan completamente adheridas a las llantas tal y como se muestra en la figura 4.8 y obviamente no pueden ser utilizadas. Luego bastó con analizar los resultados de la prueba para determinar si era o no necesario realizar dos controladores PID diferentes para cada molde.



**Figura 4.8** Termocuplas adheridas a la llanta luego del vulcanizado

Los resultados de esta prueba no se expondrán con más detalle en este documento, sin embargo se puede hacer referencia al apéndice A.3; por ahora, lo importante es mencionar que los resultados fueron positivos y que se determinó que bastaría con diseñar un único PID para controlar la temperatura de ambos moldes.

Luego de seleccionar y estudiar un método para la obtención de la ecuación característica de una planta real de manera experimental, el cual se explicará con detalle en el capítulo 5, se preparó todo lo necesario para obtener de manera experimental la curva característica de la planta respondiendo a un escalón, que en este caso correspondía a la curva de respuesta del platten de la prensa al calentamiento continuo con vapor. Esta curva característica de comportamiento era necesaria, porque el método seleccionado para la obtención de la ecuación característica de la planta, está basado en ésta curva de comportamiento.

Para obtener dicha curva, se elaboró un programa sencillo para PLC en el cual, utilizando un módulo especial para leer la señal proveniente de una RTD, fuera posible monitorear la temperatura transmitida por la RTD cada 2 s y de manera simultánea de los dos plattens. Cuando el programa estuvo listo, se detuvo la prensa durante unos 30 minutos, se le substrajo todo el vapor que había en los plattens cerrando por completo la llave de paso de la tubería de vapor y abriendo la llave de salida o expulsión de la tubería de vapor y se dejó enfriar todo lo que fuera posible. Cuando ya los termómetros instalados para monitorear ésta temperatura marcaron aproximadamente unos 115° C, se cerró la llave de salida de vapor y se abrió de golpe la llave de la tubería de entrada mientras el transductor de corriente a presión que modula la apertura de la válvula mecánica que da paso al vapor hacia el platten estaba abierta al máximo, es decir, tenía 20 mA a su entrada, manteniendo completamente abierta la válvula mecánica, significando esto el escalón ante el cual debía responder la planta. De esta manera los dos platten empezaron a calentarse y el PLC inició el monitoreo de sus respectivas temperaturas.

Los datos obtenidos en esta prueba se graficaron (figuras 5.4 y 5.5) para obtener así la curva de comportamiento característica de la planta a controlar como respuesta a un escalón máximo de 20 mA. Con esta curva, se pudo proceder a realizar una serie de cálculos y despejes matemáticos para la obtención de la ecuación característica de la planta y de ahí, poder diseñar el controlador PID para actuar sobre el transductor de corriente a presión antes mencionado, ya que el control de temperatura se debía realizar regulando el flujo de vapor que entra a los platten.

Una vez que tanto el programa como el control estaban elaborados, se procedió con la modificación electromecánica de la máquina. Para esto se contrataron los servicios de una empresa especializada en el armado de paneles de control y cableado eléctrico de campo, así, luego de entregarles el gabinete tipo NEMA®, el PLC con todos los módulos necesarios y la pantalla de taco, ellos se encargaron del armado y conexión de todo el equipo del panel y luego de realizar la instalación del panel en la prensa y el cableado de campo a todos los sensores y actuadores. La modificación

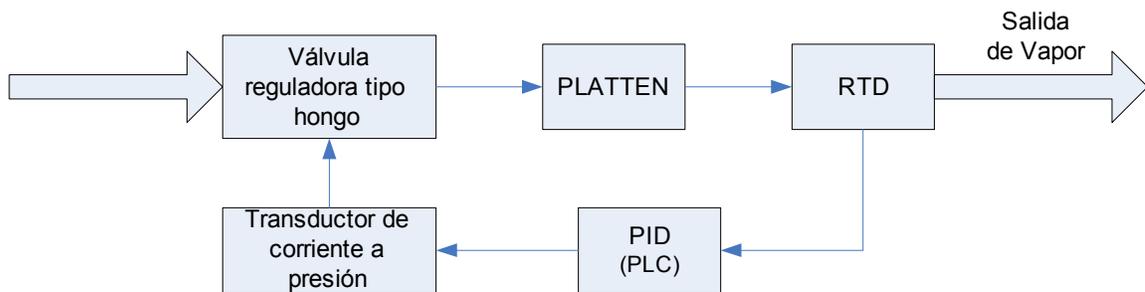
mecánica se llevó a cabo por parte de Bridgestone Firestone, con la ayuda de varios mecánicos que laboran en división 3.

Luego de tener toda la modificación terminada, se procedió a realizar la puesta en marcha, la cual se llevó a cabo en un lapso de 12 días naturales, más los días que fueran necesarios de soporte o pruebas finales del sistema.

### **5.1 Selección final de la solución**

Para la introducción de la prensa al nuevo sistema, era necesario el desarrollo del control de temperatura, ya que las prensas tipo NAF (prensas existentes en la planta que ya cuentan con el nuevo sistema) y las tipo BOM (tipo de prensas existentes en la planta que aún no están incorporadas al CCM y grupo al cual pertenece la prensa en cuestión) son sumamente diferentes en cuanto a funcionamiento, tamaño, etc. Para realizar el diseño de este control, se utilizó la teoría existente y orientada al control de procesos, ya que se consideró, al cabo de un tiempo y bastante trabajo realizado, que un modelo de la planta elaborado a base de conceptos teóricos, termodinámicos y matemáticos, resultaba en una gran complejidad y además, el resultado iba a ser bastante alejado de la realidad de la planta física, debido a los aspectos y detalles que se obvian o no se toman en cuenta a la hora de realizar un modelo teórico.

Es por eso, que se decidió utilizar métodos y técnicas existentes en el campo del control automático de procesos, ya que estos métodos de obtención de ecuaciones características para plantas son métodos empíricos y se acercan, de una manera muy satisfactoria, a la planta física real. Así, mediante éstas técnicas y cálculos, se logró derivar la ecuación característica de la planta a partir de la curva de comportamiento de la prensa ante el cambio de temperatura en la misma. Una vez obtenida esta ecuación característica, se utilizaron métodos matemáticos existentes en el campo del control automático para el diseño del controlador PID para la temperatura.



**Figura 5.1** Diagrama de bloques del sistema a controlar

En la figura 5.1 se puede apreciar como el controlador PID realizado no actúa directamente sobre la fuente de calor, sino que debe realizar el control mediante la regulación del flujo de vapor que entra al platten, manipulando con el paso del flujo la presión a la que se encuentra el vapor dentro del platten. Es preciso recordar que la temperatura del vapor de agua depende de la presión a la que éste se encuentre, teniendo estas dos variables un comportamiento directamente proporcional, es decir, que mientras el vapor se encuentre a mayor presión, también estará a mayor temperatura, siempre y cuando el recipiente que lo contenga esté presurizado y su volumen sea constante.

El método seleccionado para llegar a la solución final está basado en la curva de comportamiento de la planta ante un escalón, por lo que era necesario realizar las pruebas con las que se pudiera obtener la curva de comportamiento de la prensa ante el calentamiento continuo (referirse a la sección 4.4).

Los parámetros de los modelos empíricos deben ser determinados por análisis gráfico de la traza de la curva de reacción o por análisis de muestras del proceso y manipulación de variables. La curva es necesaria para determinar la ganancia y el tiempo muerto del modelo empírico. Además es importante destacar que, el proceso debe estar en un estado permanente cuando la variable manipulada sea cambiada y se debe permitir que el proceso alcance un nuevo estado permanente (en un nuevo valor) antes de terminar la toma de datos. Esto quiere decir, que en el caso de la prensa, ésta se debió enfriar hasta una temperatura mínima posible, quedando a una

temperatura constante, para luego cambiar la variable manipulada, que en éste caso es la corriente del transductor, y dejar que la prensa se calentara hasta el máximo posible, alcanzando un estado permanente en un nuevo valor de temperatura. El proceso para realizar esto y la toma de datos para graficar la curva de comportamiento de la prensa se describe en la sección 4.4.

Una vez obtenida la curva de reacción de los platten, se procedió a desarrollar el método gráfico para un sistema sobreamortiguado de segundo orden denominado en la literatura como *SODT Model*, por sus siglas en inglés (Second Order Plus Dead Time). Este método consiste en trazar una tangente que pase por el punto máximo de inflexión de la curva de respuesta de la planta, para determinar una serie de valores y así mediante despejes y cálculos matemáticos, obtener los valores del modelo de la planta.

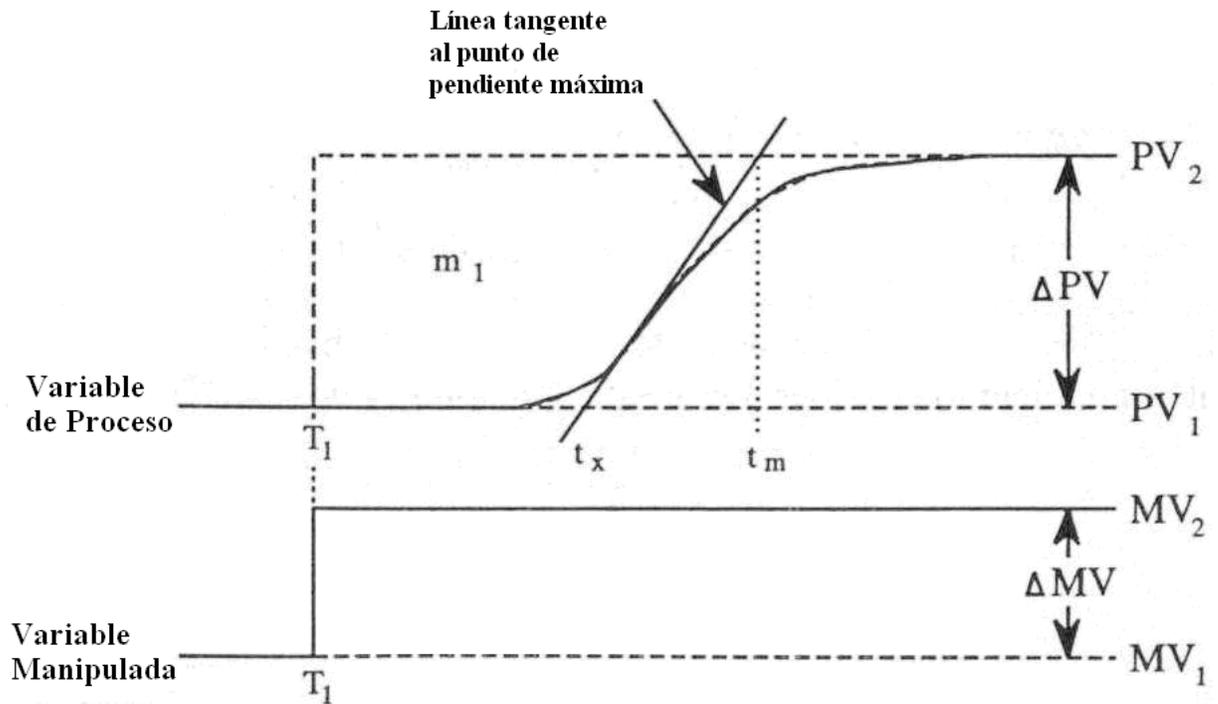
Entonces, el modelo general de un proceso de segundo orden sobre amortiguado es el siguiente:

$$G_{SODT} = \frac{Ke^{-s\theta_D}}{(\tau_1s + 1)(\tau_2s + 1)} \quad (5.1)$$

donde  $K$  es la ganancia,  $\tau_1$  y  $\tau_2$  son las constantes de tiempo y  $\theta_D$  es el tiempo muerto del proceso. Para obtener la ganancia del sistema, es necesario normalizar la gráfica y establecer el momento en el que la variable manipulada cambia como el tiempo cero del evento. Siendo esto así, la ganancia se calcula como se muestra en la ecuación 5.2:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} \quad (5.2)$$

donde  $\Delta PV$  es el cambio de la curva de respuesta y  $\Delta MV$  es la magnitud efectiva del escalón, tal y como se muestra en la figura 5.2.



**Figura 5.2** Determinación de un modelo aproximado sobre amortiguado de segundo orden [2]

Se puede demostrar que el primer momento de la respuesta normalizada  $c(t)$  es [2]

$$m_1 = \int_0^{\infty} [c(t)]dt \quad (5.3)$$

que se refiere al área marcada de la figura 5.2. Este primer momento también puede ser relacionado con la suma de los parámetros que se necesitan identificar (ecuación 5.4).

$$m_1 = \theta_D + \tau_1 + \tau_2 \quad (5.4)$$

Ahora, tomando la segunda derivada de la respuesta en el dominio del tiempo de la ecuación 5.1 e igualando a cero, el tiempo en el punto de inflexión se puede encontrar como sigue:

$$t_i = \theta_D + \alpha \cdot \ln \eta \quad (5.5)$$

donde

$$\eta = \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (5.6)$$

$$\alpha = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \quad (5.7)$$

En el punto de inflexión, la pendiente de la línea tangente  $M_i$  es

$$M_i = \frac{\eta^{\frac{1}{1-\eta}}}{(\eta-1)\alpha} \quad (5.8)$$

Esta tangente interseca el valor final de  $c(t)$  en el tiempo  $t_m$ , donde su valor está dado por la ecuación 5.9

$$t_m = \theta_D + \alpha \left( \ln \eta + \frac{\eta^2 - 1}{\eta} \right) \quad (5.9)$$

Combinando las ecuaciones 5.4, 5.8 y 5.9, se puede obtener lo siguiente:

$$(t_m - m_1)M_i = \frac{\eta^{\frac{1}{1-\eta}}}{\eta-1} \ln \eta \quad (5.10)$$

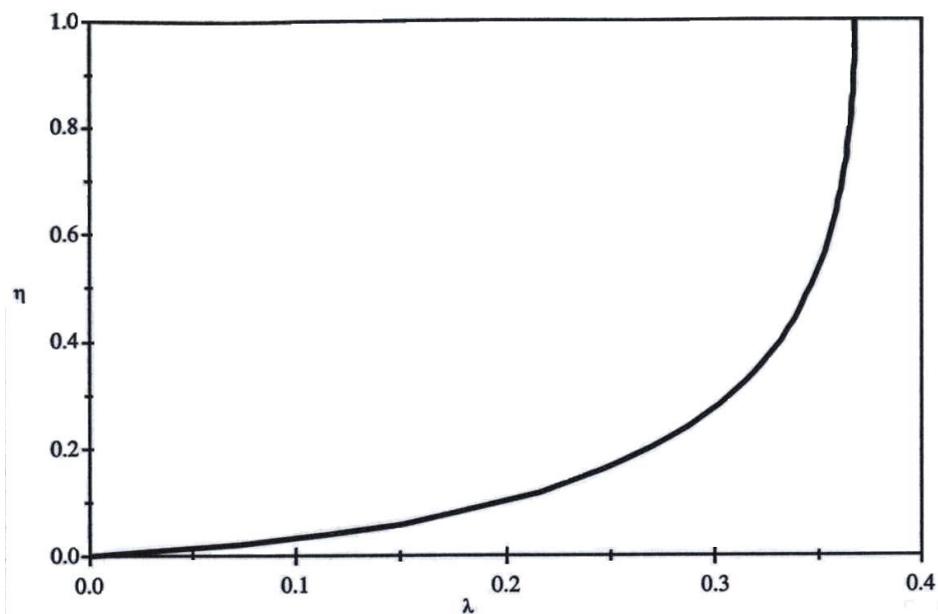
La ecuación 5.10, también se puede escribir como:

$$\lambda = \chi e^{-\chi} \quad (5.11)$$

donde

$$\lambda = (t_m - m_1)M_i \quad \text{y} \quad \chi = \frac{\ln \eta}{\eta-1}$$

Es posible simplificar la ecuación 5.10 en la forma de la ecuación 5.11 debido a que si se sustituye  $\eta$  por  $1/\eta$  en la ecuación 5.10, la parte derecha de la ecuación no varía, por lo tanto se puede considerar que  $0 \leq \eta \leq 1$ . De estas ecuaciones, también es deducible que el máximo valor de  $\lambda$  es  $e^{-1}$ , lo cual ocurre cuando  $\eta = 1$ , es decir, cuando el sistema es críticamente amortiguado. Entonces, considerando el rango de  $\eta$ , consecuentemente se puede decir que el rango de  $\lambda$  está dado por  $0 < \lambda < e^{-1}$ . Un gráfico de la ecuación 5.11 para  $0 < \eta < 1$  en función de  $\lambda$  se muestra en la figura 5.3.



**Figura 5.3** Gráfico de  $\lambda$  vs.  $\eta$  [2]

Entonces, una vez que  $m_1$ ,  $t_m$  y  $M_i$  son medidos y  $\lambda$  es calculado, el valor de  $\eta$  puede ser determinado del gráfico de la figura 5.3. Luego, usando la ecuación 5.8 se puede calcular el valor de  $\alpha$ . Los valores de  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  y  $\theta_D$  se determinan resolviendo las ecuaciones 5.4, 5.6 y 5.7.

Basándose en todo este desarrollo, se puede determinar que el procedimiento para encontrar la ganancia aproximada, el tiempo muerto y dos constantes de tiempo del sistema, consta básicamente de 6 pasos como sigue [2]:

1. La ganancia del proceso es el cambio de la variable de proceso dividido entre el cambio de la variable manipulada (ecuación 5.2).
2. Determinar el valor del área marcada de la figura 5.2, donde  $\Delta PV$  ha sido normalizado a 1. Para resultados más rápidos, se puede aproximar la integral a una integral rectangular.

$$m_1 \approx \frac{T}{\Delta PV} \sum_{k=0}^{k=n} [PV_2 - PV(t_k)] \quad (5.12)$$

donde T es el tiempo uniforme entre muestras equidistantes de la respuesta de la variable de proceso y PV2 es el valor final de la respuesta de la variable de proceso. Se deben utilizar al menos unas 10 ó 20 muestras.

3. Dibujar la tangente a la curva de respuesta de la variable de proceso en el punto de pendiente máxima, es decir, en el punto de inflexión. Luego, encontrar el tiempo en el que la tangente interseca el valor final de la respuesta de la variable de proceso y calcular el valor de ésta pendiente como

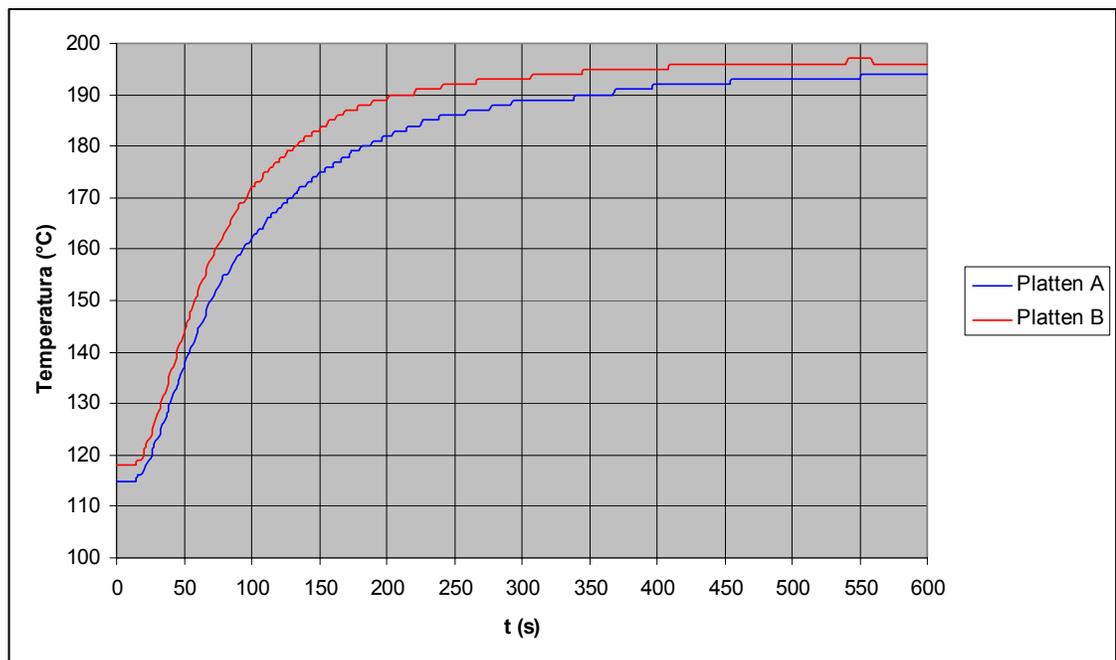
$$M_i = \frac{1}{t_m - t_x} \quad (5.13)$$

4. Calcular  $\lambda = (t_m - T_1 - m_1)M_i$ .
5. Determinar  $\eta$  del gráfico de la figura 5.3.
6. Resolver para  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  y  $\theta_D$ ,

$$\tau_1 = \frac{\eta^{\frac{1}{1-\eta}}}{M_i} \quad \tau_2 = \frac{\tau_1}{\eta} \quad \theta_D = m_1 - \tau_1 - \tau_2$$

Una vez conocido el procedimiento y todas las operaciones a realizar para la determinación del modelo de la planta, se procedió a bosquejar los gráficos de respuesta de la variable de proceso de la prensa, en este caso, la temperatura.

Tal y como se comentó en la sección 4.4, con respecto a las pruebas de las termocuplas, se puede apreciar que los comportamientos de los dos plattens es casi idéntico, con algunas diferencias en algunas secciones de los gráficos, lo cual se puede apreciar en la figura 5.4, donde aparecen ambas curvas superpuestas y donde se nota que tanto al inicio como al final, se da una diferencia de entre los 2 y los 3° C aproximadamente, donde el lado B tiende a calentar de manera un poco más rápida, pero siempre manteniendo la misma forma y comportamiento que el lado A.

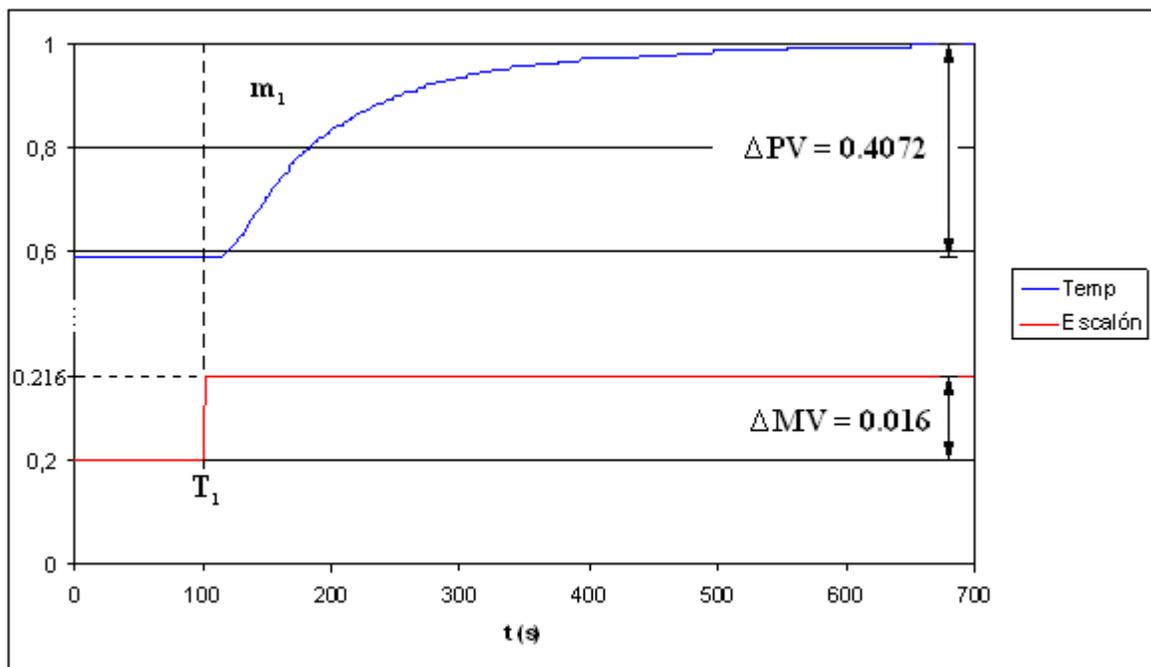


**Figura 5.4** Comparación de las curvas de respuesta de ambos lados  
**Fuente:** Tabla A.2.1

Para realizar el controlador PID, bastó con tomar una de las dos curvas, debido a que ambos lados se comportan de igual manera. Sin embargo, era importante hacer una correcta elección, ya que se debía tomar el caso más crítico, por lo que se decidió hacer el control en base al sistema que fuera más lento en responder, es

decir, el platten A. Esto debido a que lo importante es el valor máximo al que deben llegar ambos platten, que claro está, es el mismo para ambos, entonces lo crítico en este caso es el tiempo en el que se lograra alcanzar dicho valor. En la tabla A.2.1, se puede apreciar como el platten B alcanza el valor meta de 177° C (350° F) en 118 s, mientras que el platten A dura 162 s en alcanzar este valor de temperatura.

Por consiguiente, la curva correspondiente al lado izquierdo o A normalizada, se aprecia en la figura 5.5 junto con el escalón aplicado.



**Figura 5.5** Curva normalizada y escalón aplicado

Para efectos de poder apreciar en el gráfico el cambio en la variable manipulada, fue necesario “agregar” 100 segundos más al trazo. Esto porque el momento en el que se da el escalón corresponde al tiempo cero del modelo.

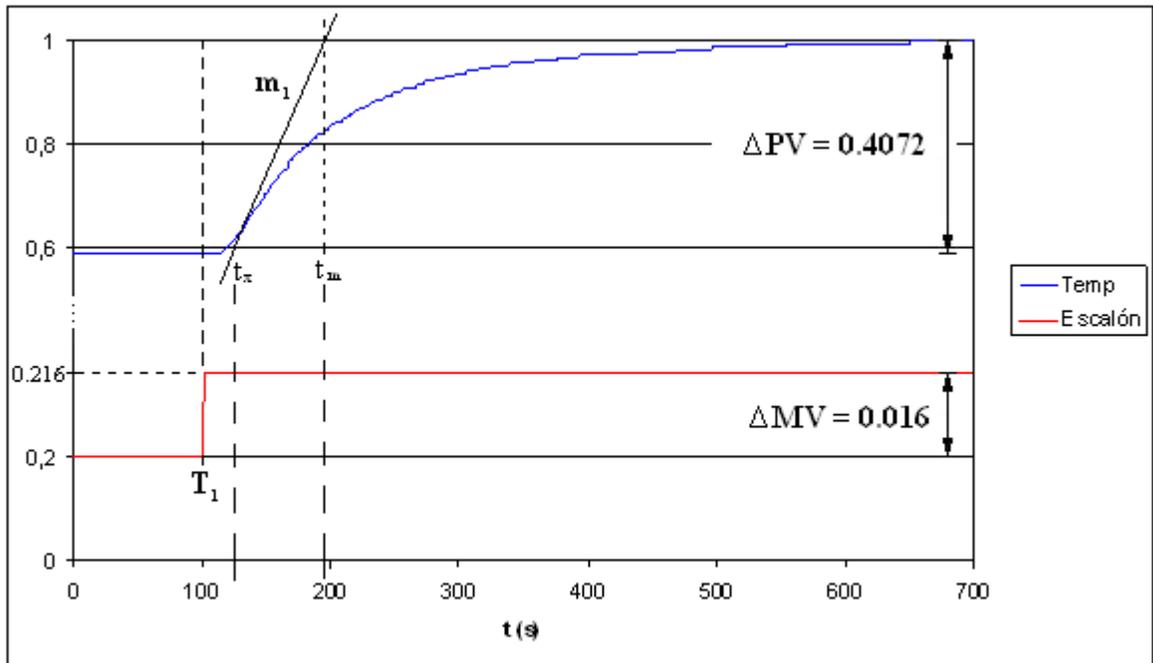
Ahora bien, haciendo uso de la ecuación 5.2, se tiene que la ganancia del sistema está dada por:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} = \frac{0.4072}{0.016} = 25.45$$

Para calcular  $m_1$ , se utilizó la integral rectangular de la ecuación 5.12, utilizando 50 muestras de la curva de respuesta del proceso.

$$m_1 \approx \frac{T}{\Delta PV} \sum_{k=0}^{k=n} [PV_2 - PV(t_k)] \approx \frac{2}{0.4072} \sum_{k=100}^{k=200} [1 - PV(t_k)] \approx 73.90$$

Seguidamente, se trazó la tangente al punto de inflexión de la curva de respuesta de la variable de proceso. Esto se muestra a continuación en la figura 5.6.



**Figura 5.6** Tangente a la curva de respuesta de la temperatura

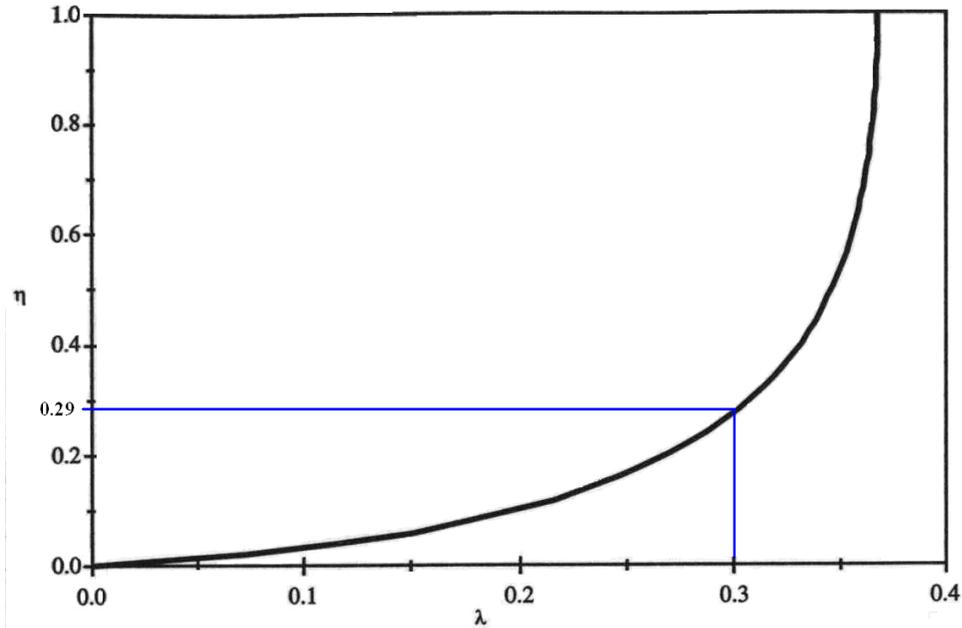
Del gráfico se puede ver que, tomando 100 s como el punto inicial, o sea  $t_0$  ( $t_0 =$  inicio),  $t_x \approx 125$  s y  $t_m \approx 195$  s, por lo que se puede proceder a realizar el cálculo de la pendiente de la tangente:

$$M_i = \frac{1}{t_m - t_x} = \frac{1}{195 - 125} = 0.0142857$$

Con este valor, se puede calcular  $\lambda$ ,

$$\lambda = (t_m - T_1 - m_1)M_i = (195 - 100 - 73.90) \cdot 0.0142857 = 0.301447 \approx 0.3$$

Una vez calculado el valor de  $\lambda$ , se utilizó el gráfico de la figura 5.3 para estimar el valor de  $\eta$  (figura 5.7).



**Figura 5.7** Cálculo de  $\eta$

Por último, se realizó el cálculo de los tres parámetros restantes para completar la ecuación del modelo de la planta. Estos cálculos son los que se muestran a continuación:

$$\tau_1 = \frac{\frac{1}{\eta^{1-\eta}}}{M_i} = \frac{0.29^{\left(\frac{1}{1-0.29}\right)}}{0.0142857} = 12.2437$$

$$\tau_2 = \frac{\tau_1}{\eta} = \frac{12.2437}{0.29} = 42.2196$$

$$\theta_D = m_1 - \tau_1 - \tau_2 = 73.90 - 12.2437 - 42.2196 = 19.4354$$

Entonces, la ecuación característica del modelo de segundo orden de la planta es la siguiente:

$$G_{SODT} = \frac{25.45 \cdot e^{-19.4354s}}{(12.2437s + 1)(42.2196s + 1)} \quad (5.14)$$

o bien

$$G_{SODT} = \frac{25.45 \cdot e^{-19.4354s}}{(s + 0.0817)(s + 0.0237)} \quad (5.15)$$

También es posible, mediante un método similar, obtener el modelo de primer orden de la planta. Sin embargo, es importante antes conocer cual es el modelo que se va obtener al aplicarle este método gráfico a la planta. La función de transferencia de un sistema de primer orden con tiempo muerto o FODT por sus siglas en inglés (First Order Plus Deadtime) es la siguiente:

$$G_{FODT} = \frac{Ke^{-s\theta_D}}{\tau_1 s + 1} \quad (5.16)$$

donde nuevamente  $K$  es la ganancia,  $\theta_D$  es el tiempo muerto aparente del proceso y  $\tau_1$  es la constante de tiempo aparente del proceso. Este método también está basado en los rasgos de la respuesta de la planta ante un escalón de magnitud  $A$ , es decir,

$$y(t) = KA \left( 1 - e^{-\frac{t - \theta_D}{\tau_1}} \right) \quad (5.17)$$

La respuesta es evaluada en dos puntos de la exponencial, cuando es 1 ( $t = \theta_D + \tau_1$ ) y cuando la exponencial es  $\frac{1}{3}$  ( $t = \theta_D + \frac{1}{3} \tau_1$ ). Cuando la exponencial es 1, el valor de la respuesta es

$$y(t) = KA(1 - e^{-1}) = 0.632KA \quad (5.18)$$

En otras palabras, la respuesta alcanza el 63.2% del cambio total cuando  $t = \theta_D + \tau_I$  y el 28.3% cuando  $t = \theta_D + \frac{1}{3} \tau_I$ . Sabiendo esto, se puede aplicar el siguiente método que consiste en cuatro pasos sencillos [2]:

1. Dibujar una tangente que pase por el punto de pendiente máxima o punto de inflexión de la curva de respuesta de la variable de proceso. Es claro que este paso es idéntico al paso 3 del método utilizado anteriormente para obtener el modelo de segundo orden de la planta.
2. El término  $T_1$  es el tiempo en el cual se da el cambio de la variable manipulada, o sea, en el cual se da el escalón. En esta ocasión se llamará  $T_2$  al tiempo en el cual la tangente corta el eje del tiempo del gráfico de la figura 5.6, llamado  $t_x$  para el método anterior. Entonces, el tiempo muerto aparente del proceso es  $\theta_D = T_2 - T_1$ .
3. El término  $T_3$  es el tiempo en el cual la respuesta de la variable de proceso ha alcanzado el 63% de su cambio total. La constante de tiempo aparente del proceso es  $\tau_I = T_3 - T_2$ .
4. Por último, al igual que en el método anterior, la ganancia del sistema se calcula con la fórmula 5.2.

Entonces bien, para obtener el modelo de primer orden de la prensa, se procedió a efectuar los cálculos necesarios. El primer paso de este método se había realizado ya para obtener el modelo de segundo orden de la planta, por lo que bastó con hacer uso de la información de la figura 5.6 en donde se aprecia que  $T_2 = t_x = 125s$ , entonces,

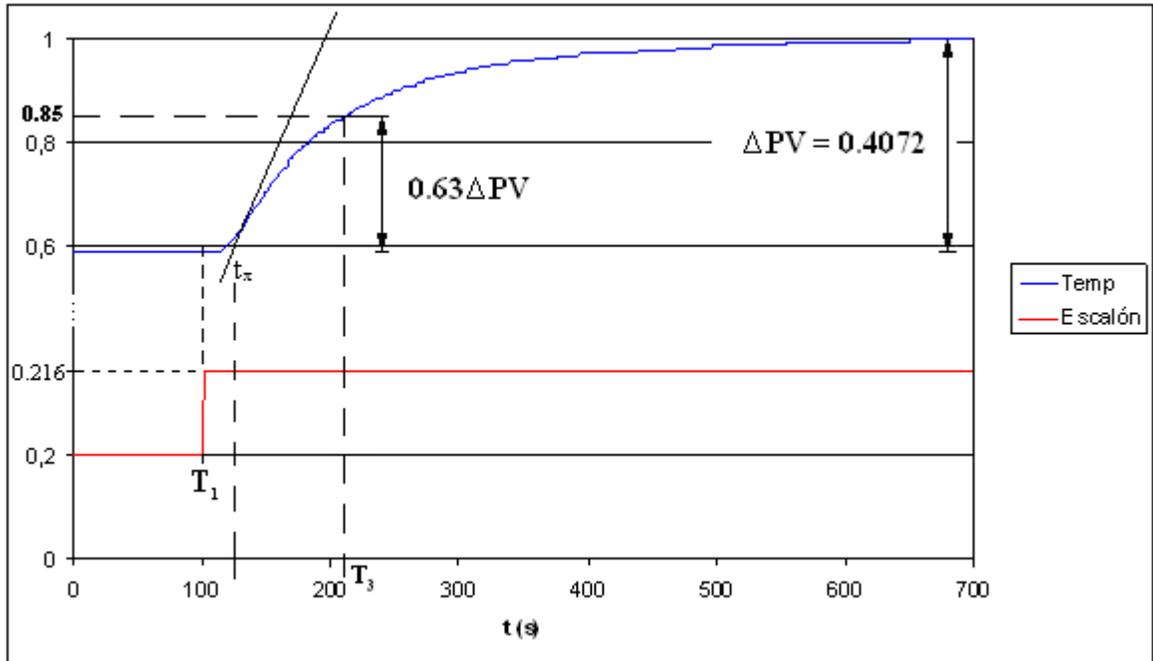
$$\theta_D = T_2 - T_1 = t_x - T_1 = 125 - 100 \Rightarrow \theta_D = 25s$$

Para realizar el paso 3, se recurrió a los datos del gráfico de la figura 5.6 donde la curva de respuesta está normalizada y sabiendo que el valor mínimo de la curva es 0.5928 (115° C / 194° C), entonces para obtener el punto en el que la curva alcanza

el 63%, primero había que calcular este valor y luego hacer uso de la curva como se muestra en la figura 5.8:

$$0.63 \cdot \Delta PV = (1 - 0.5928) \cdot 0.63 + 0.5928 = 0.8493$$

por lo tanto



**Figura 5.8** Determinación del 63% de ΔPV y T<sub>3</sub>

Sabiendo que el valor de 0.85 en la curva normalizada es equivalente a 165° C, se hizo uso de la tabla A.2.1, de donde se obtuvo,

$$T_3 = 110s + 100s = 210s$$

Hay que recordar que al gráfico de la curva normalizada se le agregaron 100 s para poder apreciar mejor el escalón. Por lo tanto, la constante de tiempo queda,

$$\tau_1 = T_3 - T_2 = T_3 - t_x = 210s - 125s \Rightarrow \tau_1 = 85s$$

Por último, se utilizó la misma ganancia  $K$  que se había calculado en el método anterior debido a que ésta no cambia de un método a otro. Así,

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} = \frac{0.4072}{0.016} = 25.45$$

Ya con todos los datos necesarios calculados, se pudo armar la ecuación característica del modelo de primer orden de la prensa, la cual se expone en la ecuación 5.19.

$$G_{FOST} = \frac{25.45 \cdot e^{-25s}}{85s + 1} \quad (5.19)$$

Se debe mencionar que la mayoría de los procesos no son de primer orden sino de órdenes superiores y los modelos de primer orden resultan solo una aproximación. Se puede decir que los sistemas suelen ser una multitud de sistemas de primer orden “en cadena”, por lo que se obtiene al final es la respuesta equivalente de un sistema de alto orden [5]. No obstante, la aproximación obtenida con el sistema de primer orden es suficiente en la mayoría de los casos y gran cantidad de los procedimientos de sintonización de PID’s usan modelos de procesos FODT [2].

En este caso, valiéndose del hecho antes mencionado y de que ambos procedimientos utilizados tanto para el cálculo del modelo de primer orden como el de segundo orden están basados en Ziegler y Nichols, se utilizó para el cálculo del PID de la planta el sistema de primer orden de la ecuación 5.19.

Sabiendo entonces que el sistema es una aproximación a un sistema de primer orden, se hizo uso de la figura 5.6 y las ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10, sin embargo, por comodidad y conveniencia, la ecuación 3.8 se modificó para que quedara de la forma

$$K_p = \frac{1.2 (t_m - t_x)}{K t_x} \quad (5.20)$$

tomando en cuenta que  $K$  es el valor final de la curva de respuesta de la variable de proceso, además de que para estos cálculos se deben suprimir los 100 s que se habían adicionado al gráfico para fines ilustrativos y se debió trabajar con los valores originales de tiempos, tomando el momento en el que se da el escalón como el inicio del proceso de la respuesta. Por lo tanto, los valores obtenidos después de utilizar este método son los siguientes:

$$K_p = \frac{1.2}{K} \frac{(t_m - t_x)}{t_x} = \frac{1.2(95 - 25)}{25} = 3.36$$

$$T_i = 2 \cdot t_x = 2 \cdot 25 = 50s \quad T_d = 0.5 \cdot t_x = 0.5 \cdot 25 = 12.5s$$

Recordando que el PID tiene una función de transferencia dada por la ecuación 5.21,

$$G_{PID} = \frac{K_p (1 + T_i s + T_i T_d s^2)}{T_i s} \quad (5.21)$$

Se obtiene finalmente, luego de algún manipuleo algebraico simple, el siguiente regulador PID:

$$G_{PID} = \frac{42 \cdot (s + 0.04)^2}{s}$$

Se pudo corroborar que, si se hubiera utilizado la ecuación 3.8 en su forma original, se hubiera obtenido exactamente el mismo resultado. Para esto se utilizó la ecuación 5.13, utilizada en el método para el cálculo del modelo de segundo orden, la cual corresponde a la pendiente de la tangente trazada. Ahora, utilizando el valor obtenido en ese punto, se tiene lo siguiente referente al valor de  $K_p$ ,

$$K_p = \frac{1.2}{0.0143 \cdot 25} = 3.36$$

lo cual es un valor idéntico al obtenido con la ecuación 5.20.

## 5.2 Descripción del hardware

En general, la mayor parte del hardware de este proyecto, se refiere a todo lo correspondiente al control de la prensa en sí, es decir, el control de todas las electroválvulas, el motor reversible de la prensa, toda la sensórica necesaria y lo referente a la interfaz con el usuario y conectividad con los servidores del CCM. Sin embargo, puede hacerse la distinción de todo este hardware de control y funcionamiento de la prensa con el hardware utilizado para realizar el control de temperatura diseñado. Además, se debe hacer referencia a que todo este nuevo sistema de control de la máquina debía conectarse mediante señales a un tercer módulo, el cual se encarga del control y manejo de la sección de post-inflado de las llantas.

Este tercer módulo denominado de ahora en adelante como post-inflado, se encarga de tomar las llantas recién curadas, montarlas sobre un aro y, como su nombre lo indica, inflarlas a una determinada presión, según el modelo y medida de la llanta, para que estas no se deformen en el proceso de enfriamiento.

El post-inflado ya existía en la prensa y era la única parte de la máquina que contaba con un PLC, esto debido a que esta sección, que de por sí es independiente de la prensa original, se agregó tiempo después de instalada la máquina. Hay que recordar que esta prensa es muy antigua y en un principio, estas máquinas no contaban con este sistema de post-inflado.

Esta sección no fue modificada en lo absoluto, ni eléctrica ni mecánicamente, durante el desarrollo del proyecto, de ahí que nunca se había mencionado dentro del presente documento. Sin embargo, se debe mencionar que algunas acciones de la prensa dependen del estado del post-inflado y viceversa, por lo que era necesario que estos dos módulos se “comunicaran” entre sí mediante señales emitidas de un lado hacia otro, es decir, una salida del post-inflado va directamente a una entrada del PLC de la prensa, para ser evaluada y considerada a la hora de que la prensa haga una determinada acción. Al mismo tiempo, dos salidas del PLC de la prensa,

van directamente a entradas del PLC del post-inflado para que éste último “tome las decisiones” del caso.

Es importante mencionar que, los módulos de entradas y salidas discretas del PLC de la prensa son de 115 V<sub>AC</sub>, a diferencia de los módulos de entradas y salidas del PLC del post-inflado que son de 24 V<sub>CD</sub>. Por tal razón, hubo que utilizar relés para poder hacer la conexión entre los dispositivos.

Volviendo ahora al hardware utilizado para el control de la prensa, la mayoría de lo más relevante al respecto ya se ha mencionado anteriormente. Se utilizó un PLC marca Allen Bradley® de Rocwell Automation®, el CPU del mismo es modelo SLC 5/05 de la serie 1747-L553, se utilizaron 6 módulos de entradas de 115 V<sub>AC</sub> con capacidad de 16 entradas individuales cada uno, 6 módulos de salidas de 115 V<sub>AC</sub> con capacidad de 16 salidas individuales cada uno, 1 módulo de entradas analógicas de 8 canales, 1 módulo de salidas analógicas de 4 canales y 1 módulo de “entradas rápidas” de 24 V<sub>CD</sub> de 16 hilos para el encoder<sup>7</sup> de la prensa. Todas las entradas y salidas discretas se pasaron primero por regleta, luego a conectores rápidos (cuando era necesario), se pasó el cable por VX<sup>8</sup> o tubería metálica hasta cajas de paso, en donde volvían a pasar por regletas y de ahí, se cablearon hacia los sensores o actuadores según fuera el caso. Tanto las entradas como las salidas analógicas se cablearon directamente al módulo correspondiente para evitar ruido en la señal o caídas significativas en el trayecto. Las entradas rápidas provenientes del encoder también se cablearon directamente al módulo.

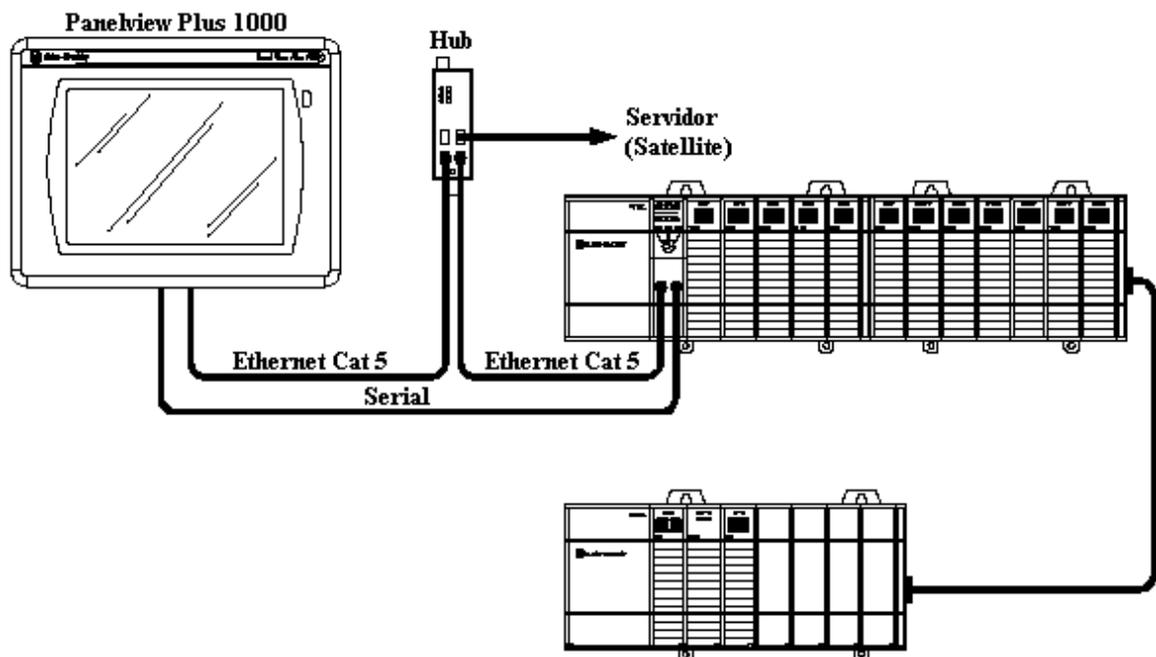
Para la entrada de la acometida de 480 V<sub>CA</sub> se utilizó un breaker CH, 3P/150 AMP marca Cutler Hammer®, luego por medio de fusibles de 10 A se alimentó el transformador de control de 2 kVA multivoltaje marca Federal Pacific®. Para el control del motor se utilizó una serie de contactores acoplados en un “Reversing Starter” Nema® marca Allen Bradley®.

---

<sup>7</sup> Ver glosario en apéndice A.1

<sup>8</sup> Idem

Para la pantalla de interfaz con el usuario, se utilizó un Panelview Plus 1000® marca Allen Bradley®. Este debía comunicarse tanto con el PLC como con el servidor Satellite del CCM. Para lograr realizar esta comunicación constante triangulada entre los tres dispositivos, se utilizó un hub Modicom de 4 puertos marca Telemecanique®. Además, a modo de respaldo para la comunicación entre el PLC y el Panelview, se utilizó también un cable serial entre los puertos seriales de ambos dispositivos. Esta conexión se aprecia en la figura 5.9.



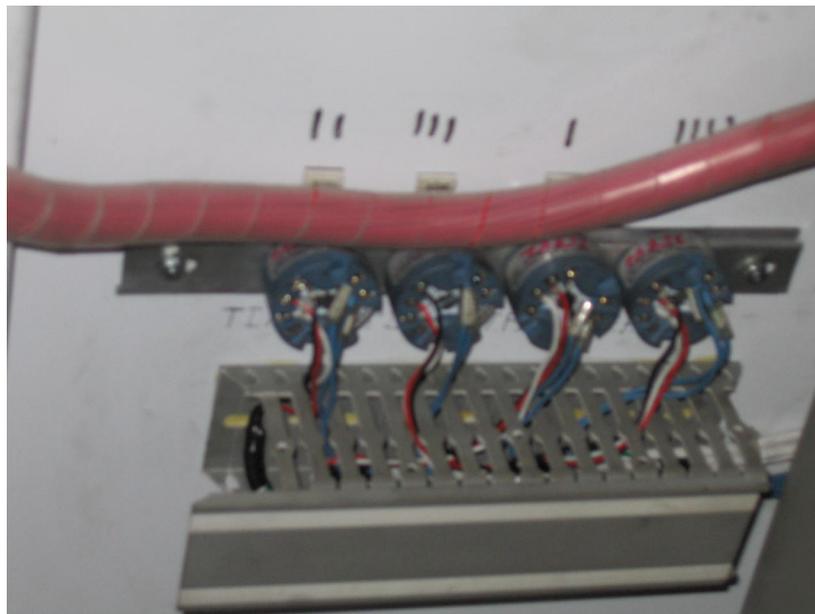
**Figura 5.9** Conexión entre los dispositivos del sistema

Todos los dispositivos mencionados, además de otros de menor relevancia, se encuentran dentro del panel tipo NEMA® 12, de dimensiones 1828.8x1003x457.2 mm (72x39.5x18") marca Rittal®. Este panel cuenta con fondo falso para facilitar el montaje de los dispositivos y las borneras. El montaje de todo esto se hizo con riel DIN de hierro marca Allen Bradley®.

En lo referente a la sensórica, se utilizaron interruptores de presión, micro interruptores de fin de carrera, sensores de proximidad inductivos de paso y de 5

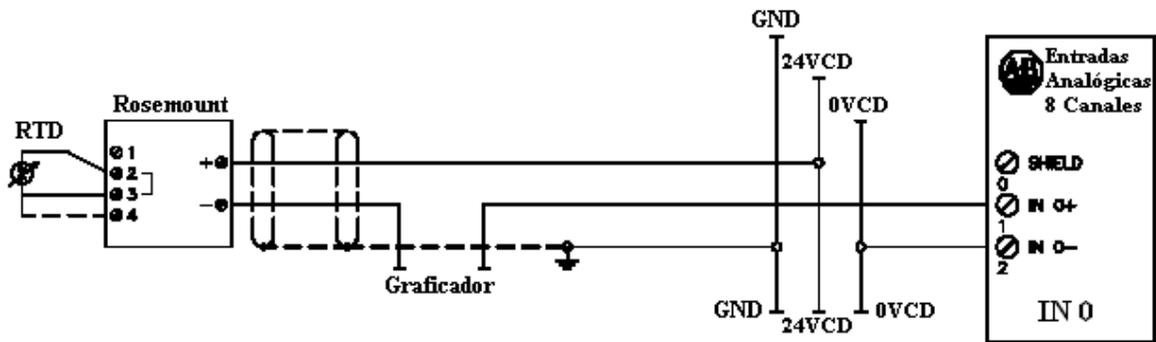
mm, fotoceldas fotoreflexivas y transductores de presión (0-400 psi ó 0-27 atm) a corriente (4-20 mA).

En cuanto al módulo correspondiente al control de temperatura, se utilizaron diferentes dispositivos para que el PLC pudiera controlar esta temperatura. Recordando el diagrama de bloques del sistema de la figura 5.1, se tiene que la medición de la temperatura se realiza a la salida de los platten por medio de RTD's. Para este proyecto en particular, se decidió no utilizar módulos de RTD para el PLC, debido a que implicaba colocar un módulo más además del de entradas analógicas, por lo que se decidió utilizar un módulo de entradas analógicas con más canales y utilizar transductores de temperatura marca Rosemount® que se encargan de convertir la señal proveniente de la RTD a corriente, con un escalamiento de 4 a 20 mA. Estos dispositivos se aprecian en la figura 5.10.



**Figura 5.10** Dispositivos Rosemount

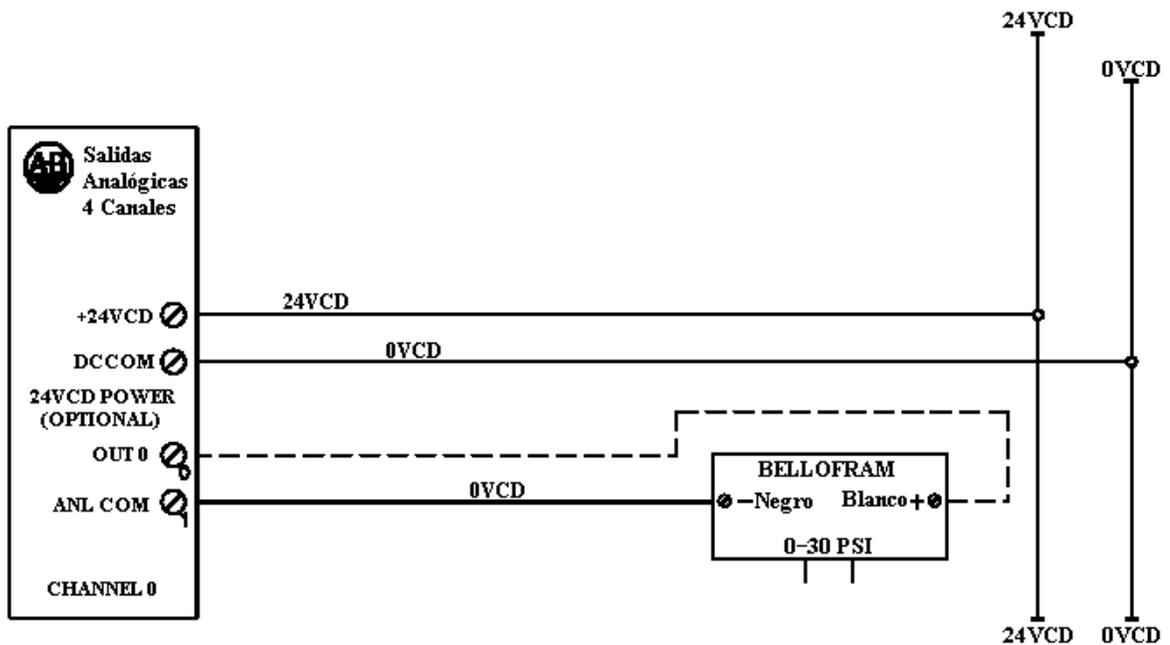
La conexión de estos dispositivos al PLC se muestra en la figura 5.11.



**Figura 5.11** Conexión de la RTD, el dispositivo Rosemount, el graficador y el módulo de entradas analógicas del PLC

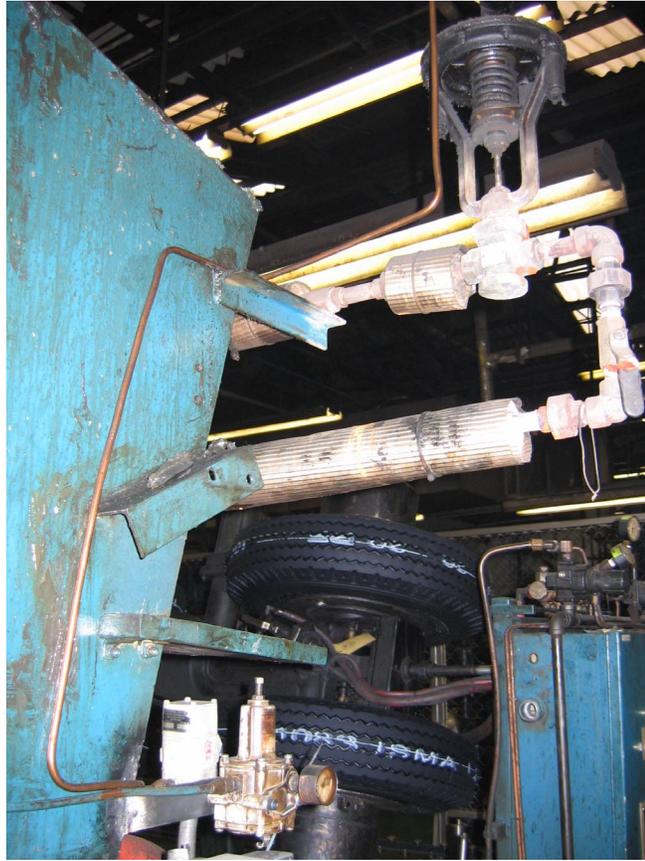
Se debe recordar de la figura 1.1, que se debía realizar un lazo de 4-20 mA entre la fuente de 24 VCD, los transductores, los graficadores y el PLC, de ahí que en la figura 5.11 se haga referencia a la conexión con el graficador, sin embargo, como estos graficadores son únicamente para observación y no se eliminaron porque el departamento de laboratorio se rehúsa a hacerlo, la conexión específica de estos no se toma en cuenta en la figura por considerarse de poca importancia. También se debe recordar que se observan cuatro diferentes temperaturas, dos correspondientes a las temperaturas de los platten y dos correspondientes a las temperaturas internas del sistema, esto es, la temperatura dentro de los bladders, por lo que la conexión presentada en la figura 5.11 se repite tres veces más.

Una vez hecha esta conexión, el PLC realiza un escalamiento de la entrada, la interpreta y la evalúa con el PID desarrollado y programado. Este último, regula la entrada según corresponda y manda una señal de control, la cual también se debe escalar y luego salir del PLC hacia el transductor de corriente (4-20 mA) a presión (0-30 psi ó 2 atm) marca Bellofram®. Esta conexión se aprecia en la figura 5.12.

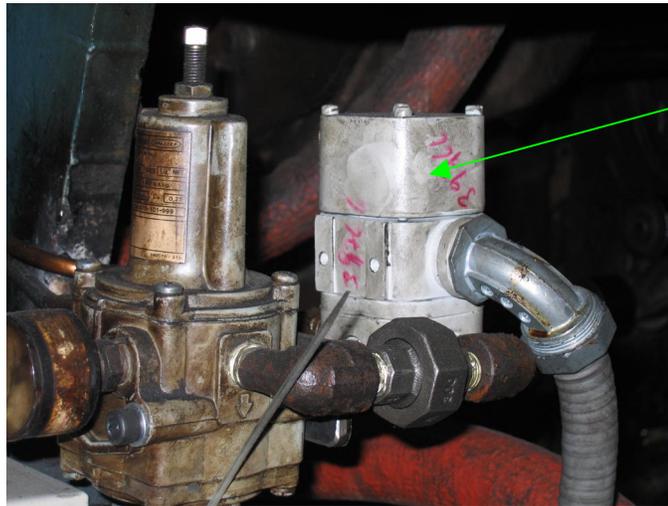


**Figura 5.12** Conexión del PLC con el transductor de corriente a presión

Este transductor de corriente a presión, es el que se encarga de regular, mediante presión de aire, la apertura de la válvula mecánica de sombrero o tipo hongo, regulando así, la cantidad de vapor de agua que entra al platten (figura 5.13). Antes de que el aire llegue al transductor, debe pasar por un regulador de presión, ya que el aire de instrumentación, que es el que se utiliza para la alimentación de aire del transductor, viene a una presión de 50 psi (3.5 atm) y como ya se mencionó, el transductor trabaja a una presión máxima de 30 psi (2 atm); esta conexión neumática se puede apreciar en la figura 5.14.



**Figura 5.13** Regulación de presión de la válvula mecánica por el transductor



**Figura 5.14** Conexión neumática del transductor y el regulador de aire

### 5.3 Descripción del software

A pesar de que el programa del PLC cuenta con 21 ladders o “escaleras”<sup>9</sup> diferentes, se podría dividir en ocho secciones bien definidas, entiéndase:

1. Ladder PRINCIPAL (por defecto es el primero, es decir, el 2).
2. Ladder de MAPEO de I/O's (3).
3. Ladder de PRENSA (7).
4. Ladder de CARGADORES (5).
5. Ladder de DESCARGADORES (6).
6. Ladder de SHAPING o FORMADO (8).
7. Ladder de TEMP PID (9).
8. Ladders de CCM (4 y del 10 al 22).

A continuación se procederá a hacer una breve descripción de cada uno de estos ocho puntos, con el fin de tener una idea global de la función de cada uno, su estructura y modo de funcionamiento.

#### 5.3.1 Principal

En este ladder se encuentran las activaciones de algunos de los bits de control más importantes del programa por ser de los que más se utilizan a lo largo de todo el programa, tanto lo correspondiente al CCM como al control de la máquina en sí, tales como el *Bit de Retardo de Seguridad (CRS Bit)*, *Auto Apertura de Prensa*, *Auto Cerrado de Prensa*, *Auto Ciclo*, *Auto Run*, que son bits que definen ciertas pautas de funcionamiento automático, ya que por ejemplo, si el bit de Auto Apertura no está

---

<sup>9</sup> Ver glosario en apéndice A.1

activo, la prensa no cerrará de manera automática, solo manualmente. Otro ejemplo es el bit Auto Ciclo, el cual se necesita activo para que la prensa realice el curado de la llanta, su monitoreo y control. También se encuentran algunos de los temporizadores más utilizados e importantes del control total de la prensa, como por ejemplo *CRS Retardo para que el Relé Levante (CRS DELAY)*, *Temporizador Seguro de Falla de Ciclo (TS)*, que son temporizadores utilizados para seguridades de funcionamiento.

Se aclara el hecho de que en este ladder no se realizan funciones relacionadas con el funcionamiento de la prensa, es decir, no se activan salidas, solamente se evalúan condiciones para activar los bits de control.

Por último, este es el archivo que “llama” a todos los demás archivos del programa, es decir, si en este archivo no se invoca algún otro archivo necesario para el programa por medio de la instrucción JSR, el archivo nunca se podrá ejecutar.

### **5.3.2 Mapeo de I/O's**

En este ladder se hace un mapeo de todas las entradas y salidas que se hacen necesarias para el control y funcionamiento de la prensa, a excepción de las entradas y salidas analógicas y el encoder. La idea de éste archivo es evitar problemas en caso de que sea necesario, por alguna razón, cambiar una o varias entrada(s)/salida(s) de borne en el módulo, o incluso de módulo. Así, en caso de que esto sucediera, bastaría con cambiar la dirección de la(s) entrada(s)/salida(s) en este archivo y no en todo el programa.

Este archivo está ordenado para facilitar la búsqueda de las entradas y salidas de la siguiente manera:

- **Entradas:**
  - Selectores

- Botones
  - Sensores
  - Auxiliares (Confirmaciones de relés como seguridad, barra, presión, motor y salida desde el PCI hasta el PLC de la prensa).
- **Salidas:**
    - Luces indicativas y alarmas del panel.
    - Electroválvulas y relés de acción (Abrir y Cerrar Prensa).
    - Válvulas del Ciclo de Curado Lado A.
    - Válvulas del Ciclo de Curado Lado B.
    - Salidas al Post-Inflado.

### 5.3.3 Prensa

En este ladder se realiza el control y/o activación de algunos bits de control referentes a los movimientos de la prensa, además de que se encuentra todo lo referente a la activación de las electroválvulas de uso específico. Así por ejemplo se encuentran las activaciones de *Abrir Prensa*, *Cerrar Prensa*, *Accionamiento de la Barra de Seguridad*, *Auto Lubricación y Retorno de Lubricación*, *Subir y Bajar Pistones*, *Subir y Bajar Cilindros*, *Vacío de Prensa Abierta*, *Aire de Prensa Abierta*, *Aire de Prensa Cerrada*, entre otros.

En este ladder se encuentran las activaciones de las salidas que hacen funcionar el sistema; pero no se encontrará nada relacionado con la carga o descarga de las llantas, el formado (o shaping) de estas, el ciclo de curado o las acciones de los PID desarrollados, ya que todos estos aspectos son manipulados en ladders específicos para ellos.

### 5.3.4 Cargadores

En este ladder se realiza absolutamente todo el control referente a los brazos cargadores. Este archivo, al igual que el correspondiente al de los brazos descargadores, está hecho utilizando una lógica de pasos, con el fin de facilitar la localización de posibles fallas en el funcionamiento de los brazos. El archivo está subdividido en cuatro secciones debidamente etiquetadas y en el siguiente orden:

#### 1. **Secuencia de pasos de los brazos cargadores:**

En esta sección se puede visualizar el paso en el cual se encuentra actualmente la secuencia de los brazos. Para que un paso sea activado deberá haber terminado el paso anterior, lo cual se hace constar con un bit de *Transición*, así por ejemplo, para que el paso 1 sea habilitado, las condiciones del paso 0 se deben haber cumplido completamente, accionando el bit de Transición 0. Entonces, los bits Paso 0 y Transición 0, activan (Latch) el bit Paso 1 y desactivan el bit Paso 0 (Unlatch) y de igual manera, los bits Paso 1 y Transición 1, activan (L) el bit Paso 2 y desactivan (U) el bit Paso 1. Como la secuencia se trata de un ciclo, una vez que la máquina se “encicló” sucede que los bits Paso 8 y Transición 8 (últimos de la secuencia), activan (L) el bit Paso 0 para volver a empezar el ciclo.

#### 2. **Transiciones de los bits de control:**

En esta sección se activan y desactivan los bits de control necesarios para el funcionamiento correcto de los brazos cargadores. En la medida de lo posible, se trató de que la activación (L) y desactivación (U) de los bits, se encontraran seguidos, es decir, que si por ejemplo la activación del bit B3:20/14 (Alarma de Paro de Prensa por Temperatura) se encuentra en el RUNG<sup>10</sup> 16, la desactivación de éste bit, se encuentra en el RUNG 17.

---

<sup>10</sup> Ver glosario en apéndice A.1

### **3. Transiciones de los brazos cargadores:**

En esta sección se evalúan todas las condiciones necesarias para que un paso se cumpla y los brazos cargadores puedan realizar la siguiente acción. Como primera condición siempre se evalúa el número de paso en el que se encuentra, por lo que si en algún momento los brazos no funcionaran correctamente, bastaría con revisar la primera sección de Secuencia de Pasos, verificar en cual de los pasos se quedó la secuencia y luego verificar en esta sección cuál es la condición que no se está cumpliendo para que se pueda dar la transición y así el siguiente paso. En esta sección se revisan las condiciones para que se pueda dar la acción del siguiente paso.

### **4. Lógica de los brazos cargadores:**

En esta sección se activan las electroválvulas y los temporizadores para que los brazos ejecuten las acciones necesarias. Al igual que en la sección anterior, la primera condición a evaluar es el número de paso en el que se encuentra, ya que depende de esto la acción que deben realizar los brazos. Entonces, en el Paso 0 se ejecuta una acción, pero mientras las condiciones correspondientes al paso 0 no se cumplan, no se accionará el bit de Transición 0, por lo que el Paso 1 no se accionará y quedará estancado en el paso 0 hasta que se cumplan todas las condiciones correspondientes a la acción que deben tomar los brazos cargadores. Además, en esta sección también se evalúan ciertas condiciones según la acción que se deba realizar. Esto con un fin de seguridad en caso de que ocurra un “desenciclamiento” de los brazos y si por algún motivo se encontraran dos pasos activos en un mismo instante y las condiciones correspondientes de un paso coinciden parcialmente con las del otro, entonces las condiciones que van a hacer la diferencia para que se ejecute una acción u otra, son las evaluadas en esta sección.

El funcionamiento y la lógica de esta secuencia están fundamentados en el diagrama de flujo de la figura 4.1.

### **5.3.5 Descargadores**

Este ladder está elaborado con la misma lógica utilizada para los brazos cargadores, por lo que está subdividido de igual manera y la función de cada sección es exactamente la misma.

El funcionamiento y la lógica de esta secuencia están fundamentados en el diagrama de flujo de la figura 4.2.

### **5.3.6 Formado o Shaping**

Este ladder se hace cargo de una sección de la máquina que aunque pequeña, tiene dos aspectos que mencionar: la primera es que, como su nombre lo dice, es la sección encargada del formado de las llantas, lo cual se hace mediante el inflado y desinflado de los bladders. Hay que recordar que los bladders están montados en los cilindros y pistones ubicados en el centro de los moldes, por lo que las secciones centrales de las llantas se introducen en éstos, luego se inflan y ejercen presión contra el molde caliente para darle el diseño a las llantas, además de que mediante la introducción de vapor y agua caliente es que éstos las calientan en la parte interior.

La otra cuestión de relevancia con respecto a esta sección, está relacionada con el hecho de que los bladders se inflen con vapor caliente, ya que al estar expuestos podrían causar un accidente grave si alguno estallara por exceso de presión. Esto podría darse fácilmente debido a que los bladders son de hule y éste material aunque es elástico y resistente, podría ceder ante presiones muy altas. Este aspecto, hace que esta sección del programa sea de mucho cuidado en cuanto a la activación de las electroválvulas que accionan el inflado de los bladders, para que esta acción se realice en el momento adecuado y así evitar un accidente.

### **5.3.7 Temp PID**

En este ladder es donde se encuentra la lógica correspondiente a la adquisición de los datos de temperatura de los dos platten mediante la conexión de la figura 5.15, el escalamiento de los valores adquiridos, el control mediante el PID, el escalamiento de la salida controlada por el PID y la salida hacia el transductor de presión. Aunque realmente aquí es donde se hace efectivo el control de temperatura que se supone es la sección de más peso del proyecto, la lógica requerida es bastante simple, ya que el software utilizado para la realización del programa, el RSLogix 500® para PLC's Allen Bradley®, cuenta con una herramienta para la implementación de PID's, en la cual simplemente se introducen los parámetros calculados en la sección 5.1, es decir, la ganancia K, el  $T_i$  y el  $T_D$ , además de otros parámetros como tiempo de muestreo deseado, la lógica del controlador (negativo o positivo), el modo (manual o automático), entre otros.

### **5.3.8 CCM**

Todo el resto del programa es dedicado a las acciones del sistema CCM, es decir, todo lo relacionado con la comunicación con el servidor Satellite, la adquisición de datos y eventos por parte del servidor, la descarga de parámetros, recetas y otros desde el servidor al PLC, ya sea por medio de una computadora conectada a la red del sistema o por medio de la pantalla de tacto instalada en el panel de la prensa, el monitoreo y toda la lógica de los ciclos de curado, todas las activaciones de las alarmas, comunicación con la interfase del operador, etc.

Estos ladders son de una alta complejidad por el tipo de función que tienen, por lo que solamente se mencionará el hecho de que la adaptación de éstos al funcionamiento de la prensa fue un trabajo extenso y complicado. Además, estos ladders no tienen gran relevancia para efectos del control de temperatura, ya que lo único que se debía tomar en cuenta era el hecho de que tanto los límites como los valores meta de las temperaturas son dados por el CCM por medio de los

parámetros y recetas descargadas al PLC. No obstante, si la temperatura se sale de los rangos establecidos, es un ladder CCM el que activaría la alarma.

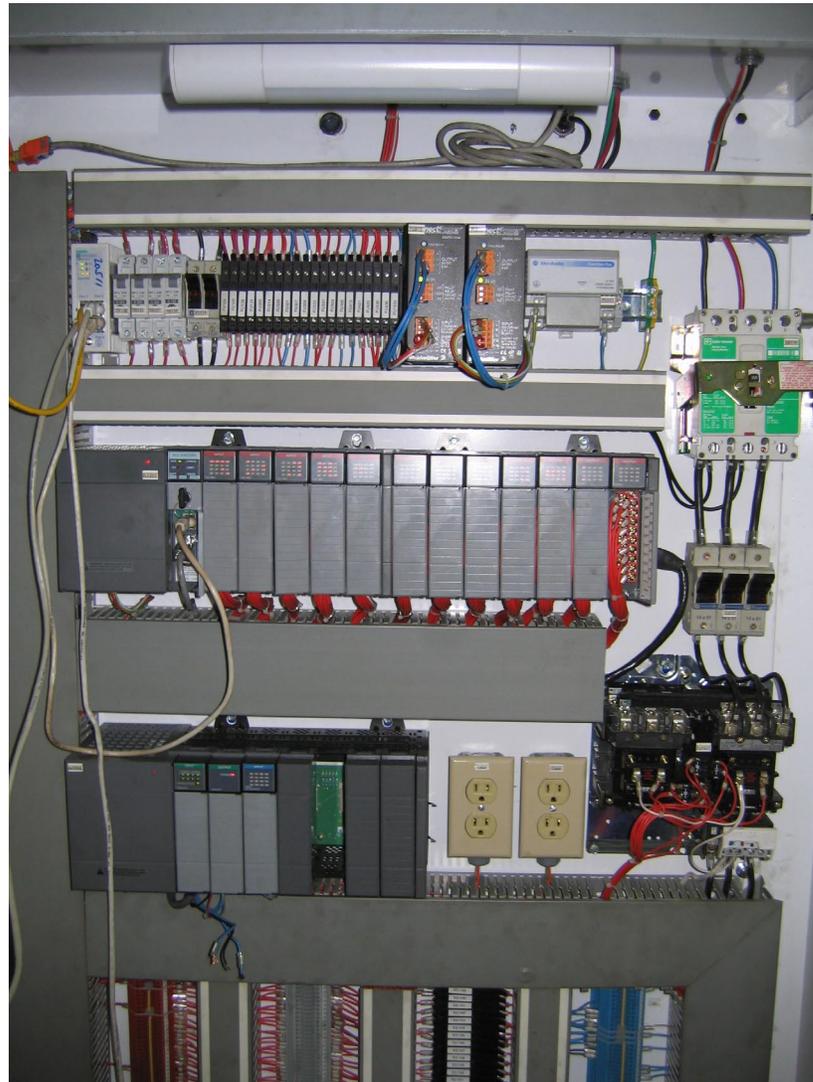
## Capítulo 6

### Análisis de resultados

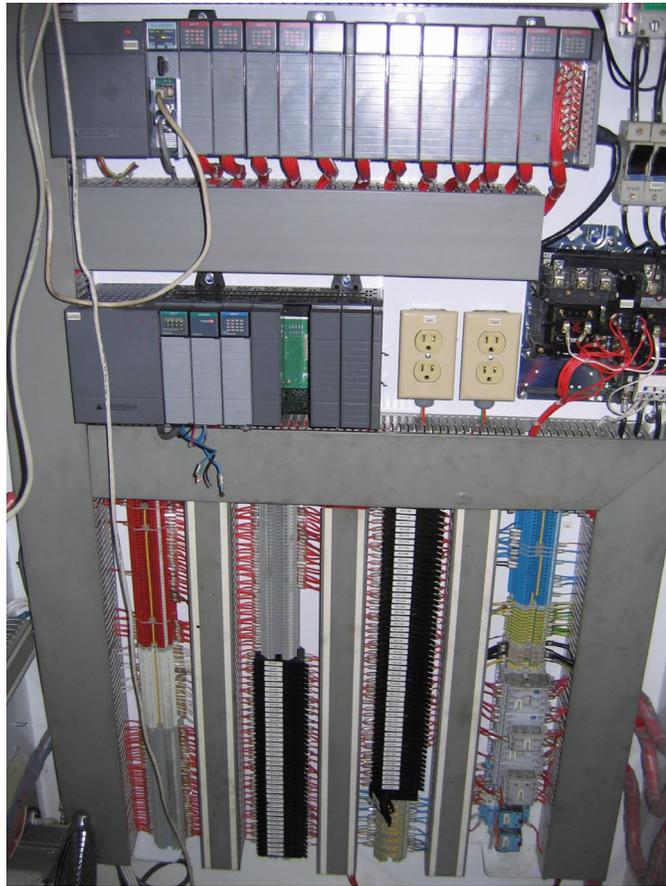
---

#### 6.1 Resultados

El producto final se puede apreciar en las figuras 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4.



**Figura 6.1** Vista superior del interior del panel de control



**Figura 6.2** Vista inferior del interior del panel de control



**Figura 6.3** Vista interior de la puerta del panel de control



**Figura 6.4** Vista frontal exterior del panel de control

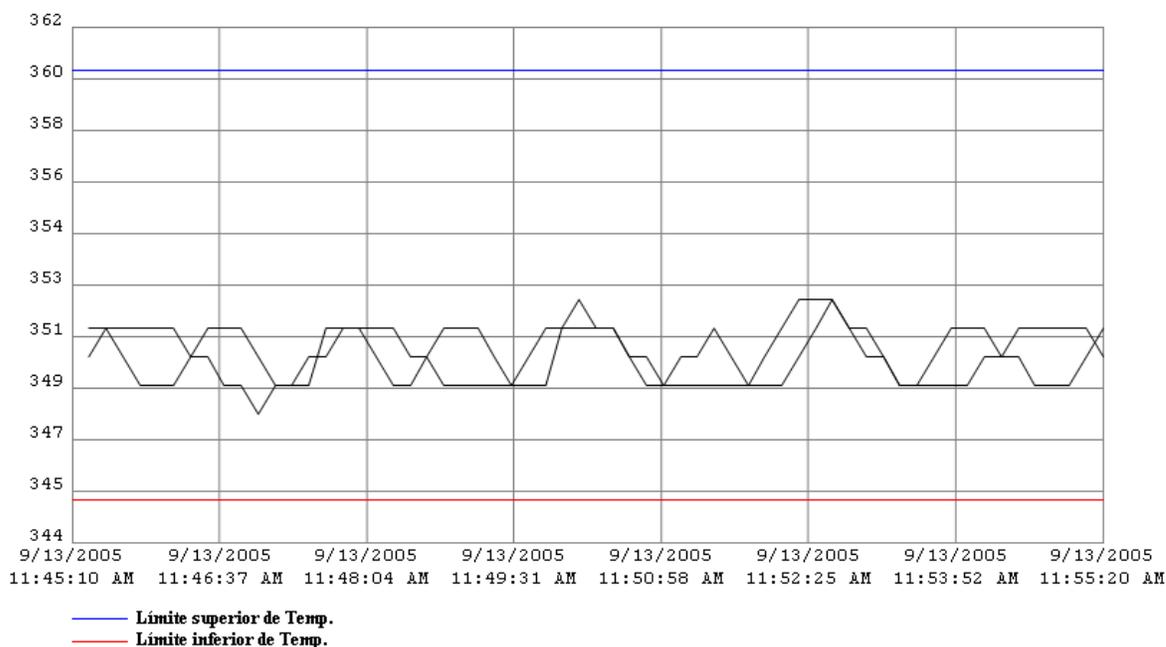
En las figuras 6.1 y 6.2 se puede apreciar como se mantiene un orden indispensable para hacer mejoras o detectar de manera rápida problemas y fallas. Incluso, si se quisiera hacer algún cambio o modificación en el cableado, esto no sería un problema, debido a que todos los cables, bornes, módulos y dispositivos están numerados y esta numeración aparece en los planos eléctricos de la máquina.

En la figura 6.3 se aprecia como la botonera y las luces indicativas del panel también se cablearon siguiendo la misma metodología de cableado, lo que hace, al igual que con el resto del equipo, que los cambios o mejoras se hagan de una manera mucho más rápida y fácil. La figura 6.4, muestra el panel completo y la distribución en la botonería, luces y selectores, además de la ubicación de la pantalla de interfaz con el usuario y los graficadores. También se aprecia como todos los manómetros y llaves neumáticas quedaron centralizadas en un solo lugar, de manera que es más fácil controlar todo el aspecto neumático de la prensa. Es claro que la nueva distribución de todo el panel facilita el uso de la máquina por presentar todo mucho más ordenado y centralizado por tipo de dispositivos.

Con respecto al PID realizado, se puede apreciar en la figura 6.5 que, aunque claramente no mantiene la temperatura constante todo el tiempo, lo cual sería prácticamente imposible, las fluctuaciones dadas siempre permanecen dentro de los rangos de temperatura permitidos según las especificaciones programadas por medio del CCM por el departamento de laboratorio a la prensa.

Durante la puesta en marcha, se vulcanizaron unas 17 llantas distribuidas en 9 diferentes cargas en total. Las primeras pruebas se realizaron únicamente en la cavidad izquierda, luego se vulcanizó en la cavidad derecha, lo cual, hubo que hacerlo dos veces debido a que en la primera carga de este lado, se detectó una pequeña fuga en el bladder utilizado. Seguidamente se realizaron las pruebas de las termocuplas nuevamente, pero esta vez para fines de pruebas de laboratorio, por lo que la distribución de las termocuplas era diferente. Para esta prueba se necesitaron dos cargas, una para medir las temperaturas externas y otra para medir las

temperaturas internas de las llantas. Con estas pruebas el departamento de laboratorio revisa, entre otras cosas, porosidad en las llantas, nivel de “cocción” en las diferentes secciones de las llantas y una serie de parámetros teóricos que se deben calcular con base a los datos de temperatura obtenidos. Todas las pruebas resultaron positivas.



**Figura 6.5** Gráfico del comportamiento de la temperatura desplegado por el CCM

Estas primeras siete llantas se catalogaron como scrap<sup>11</sup> debido a que no pasaron por el post-inflado. Las otras 10 llantas se vulcanizaron para terminar de afinar los últimos detalles en el funcionamiento de la prensa, tanto lo relacionado con el control mecánico como lo relacionado con el CCM. Estas últimas cinco cargas, a pesar de que si pasaron por el post-inflado, también se tuvieron que catalogar como scrap debido a que el departamento de laboratorio pide que las llantas vulcanizadas antes de que ellos den a conocer los resultados de las pruebas, no se liberen, para evitar que alguna llanta en mal estado pueda filtrarse dentro de las llantas que van al mercado.

<sup>11</sup> Ver glosario en el apéndice A.1.

## 6.2 Análisis

Es claro que al finalizar este proyecto se cumplió a cabalidad con lo planteado en el objetivo general del mismo. Se implementó el control de temperatura necesario para que la prensa 20 tipo BOM pudiera ser introducida al nuevo sistema de control y monitoreo CCM.

Como se observa en las figuras de la 6.1 a la 6.4, y como se comentó en la sección anterior, el nuevo panel de control facilita cualquier tipo de trabajo eléctrico en la prensa, ya sea correctivo o preventivo. Esta facilidad la da el orden en el cableado de los elementos de campo, así como la distribución de todos los accesorios dentro del panel. Además, la utilización de un controlador lógico programable para realizar el control de la máquina garantiza una gran facilidad a la hora de implementar, de ser necesario, nuevas rutinas o funciones en la prensa, ya que basta con agregar o quitar lo deseado al programa. También es importante recalcar que la utilización de un PLC y una pantalla de tacto en el panel del operador, modernizan el control de la máquina.

Una de las ventajas que tiene el nuevo equipo utilizado en la instalación de la prensa es que, en primer lugar, al ser componentes nuevos, se asegura encontrar fácilmente repuestos o reemplazos en el mercado, además, también se pueden encontrar en la bodega de repuestos de la planta, ya que es el tipo de equipo utilizado en la gran mayoría de las máquinas automatizadas, que son prácticamente todas, quedando por fuera solo unas pocas que, al igual que la prensa, tienen una gran antigüedad. Este último aspecto, trae una ventaja de manera intrínseca, que es el hecho de que no fue necesario agregar nuevos elementos al inventario de la bodega y esto, aunque no era un objetivo del proyecto, es un beneficio extra del mismo, ya que se evita todo el trámite administrativo que implica la introducción de nuevos repuestos al inventario de bodega.

Se dice que en un sistema eléctrico, la cantidad de puntos de conexión es directamente proporcional a la cantidad de puntos de error. Esto se debe a que es

más probable que exista un error en cuanto a cableado a que exista un problema con el cable mismo, es decir, las probabilidades de que un cable pierda continuidad o presente algún problema son muy pocas, en comparación a las probabilidades de que exista algún error de tipo humano a la hora de realizar el cableado, como por ejemplo cablear a un borne equivocado, cambiar la polaridad en algún punto del trayecto, hacer un falso contacto en algún borne, etc. Sin embargo, en el momento en el que se presente una falla, es mucho más fácil localizarla por sectores, lo que se obtiene con los diferentes puntos de conexión en las cajas de paso, además de que también es mucho menos problemático solucionar la falla, debido a que si por ejemplo, es necesario cambiar un cable por alguna razón, es más fácil y menos costoso cambiar el cable de un sensor o actuador a una caja de paso, que uno que vaya hasta el panel de control.

Por su parte, la pantalla de interfaz con el operador, es una herramienta que facilita el trabajo de todos los posibles usuarios de la máquina, esto incluye al operador de la prensa, el supervisor de vulcanización que es quien realiza los cambios de receta en la prensa cuando es necesario, los técnicos del área o la división, las personas del departamento de laboratorio, los cambia moldes, los cambia bladders, los mecánicos y los ingenieros de proyectos y de mantenimiento. Entre los beneficios que trae esta pantalla de tacto a los usuarios, se puede citar el hecho de que la descarga de recetas y parámetros se puede realizar desde la pantalla, o sea, en sitio, pero con la diferencia de que el procedimiento, además de ser visual, no toma más de un minuto. También es posible visualizar el código de identificación del ciclo de curado programado, el código de los moldes, el código de los bladders, el número de cargas de cada bladder (también se puede reiniciar este contador), el tiempo total del curado, la cantidad de pasos del ciclo, el tiempo y el número de cada paso en el que se encuentra el ciclo, el orden de activación de las diferentes válvulas de curado por paso, el estado de la prensa, la temperatura meta y actual de los platten, la temperatura interna del momento, las presiones internas presentes durante el ciclo

de curado, la posición del encoder, entre otra gran cantidad de información necesaria y útil para cada uno de los usuarios de la máquina.

Una de las principales funciones de esta pantalla, es la de comunicar si hay algún tipo de alarma activa y cual es el problema exactamente, así por ejemplo, en esta aparece una pequeña pantalla de color rojo intermitente indicando qué alarma está activa, además de guardar el registro de todas las alarmas que se han presentado. Esto tiene la gran ventaja de ser muy puntual en cuanto al problema presente, ya que existe una gran variedad de mensajes de alarma, con lo que se trató de abarcar todos los posibles problemas en la prensa, desde una temperatura o presión fuera de tolerancia, hasta un exceso de tiempo con la prensa abierta, lo que la inhabilita hasta que se realice un calentamiento con la prensa cerrada.

Con respecto a los resultados obtenidos con el controlador PID para la temperatura, éstos se mantienen dentro del rango de tolerancia permitido, lo cual implica un margen de error del 3.5% hacia arriba del valor meta y el 1.6% hacia abajo del valor meta, parámetros establecidos por el departamento de laboratorio. Sin embargo, se debe recalcar que, como era de esperarse, el PID obtenido no fue del todo exacto, es decir, la función obtenida no se mantuvo dentro del margen de error deseado que era del 0.6% al 0.7% en el sistema en cuestión, sino que presentó un margen de error oscilando entre el 1.1% y el 1.5%, haciéndose necesario la manipulación de los parámetros del PID en campo, hasta lograr una buena puesta a punto del controlador.

Se dice que este aspecto era esperado debido a que los métodos utilizados para diseñar este tipo de controladores de sistemas con retardos, son en su mayoría por no decir en su totalidad, aproximaciones de los sistemas, por lo que dejan de lado algunos aspectos que pueden tener alguna relevancia a la hora de aplicar el control. Además, al haberse utilizado un método gráfico, es claro que se introduce un porcentaje significativo de error humano. Haciendo referencia a la sección 5.1, en donde se explica de manera detallada el procedimiento utilizado, se recuerda que

uno de los puntos clave del procedimiento de Ziegler-Nichols, es la traza de la tangente por el punto de inflexión de la curva de respuesta de la variable de proceso, en este caso, la temperatura. Esto hace suponer que el porcentaje de error introducido en éste método es considerable, debido a que localizar visualmente el punto de máxima pendiente de una curva, no es ni fácil ni confiable. Entonces, desde este momento, se debe tener en cuenta que se está llegando a una aproximación de los valores realmente prácticos que necesita el PID para controlar correctamente la variable de proceso.

No obstante, también es pertinente aclarar que la aproximación obtenida estaba siempre dentro del rango del margen de error permitido por el laboratorio y además los valores finales de los parámetros del PID, no distan mucho de los obtenidos mediante el método. Además no se requirió mucho tiempo para lograr la puesta a punto correcta del controlador, tomando en cuenta que un sistema térmico no es un sistema que se caracterice por rapidez en su respuesta.

También es importante recalcar que el valor meta de temperatura de los platten, puede variar de ciclo a ciclo programado, dependiendo de la medida de las llantas. Esto hace que el PID diseñado actúe mejor para unas medidas que para otras, pero siempre manteniéndose dentro de los rangos permitidos por el departamento de laboratorio.

Cuando se logró poner a punto el controlador para una medida de llanta específica, la cual ocupaba una temperatura de platten de 350° F (aproximadamente unos 177° C), se dio por terminado este proceso, sin embargo, al cambiar de medida de molde para una llanta más grande, la cual ocupa una temperatura aproximada de 310° F (unos 154° C), fue necesario hacer nuevamente ajustes en el controlador. Estos ajustes se basaron en observaciones indirectas de la respuesta del proceso, porque no era posible obtener la respuesta desde cero de todo el proceso cada vez que se modificaba el controlador por razones de restricciones en costos y tiempo. Por ende, los criterios utilizados para lograr la puesta a punto del controlador, tuvieron que ser,

necesariamente, basados en la respuesta en estado permanente, obviando en cierto modo los efectos de la sección de la respuesta en régimen transitorio, pero que además, no tenían un efecto significativo en la respuesta final debido al tipo de planta con la que se estaba trabajando.

Es posible que el hecho de que se utilizara una aproximación de un sistema de primer orden también tenga sus implicaciones en el resultado del diseño final, ya que este es precisamente eso, una aproximación. Sin embargo, se tiene la limitante de que los procedimientos para diseñar controladores tipo PID, PI o PD para este tipo de sistemas con retardos, son elaborados únicamente para sistemas de primer orden, haciendo alusión al hecho de que las diferencias entre los modelos aproximados de primer orden y los de mayor orden, son poco perceptibles si se realiza una buena toma de datos para obtener el bosquejo de la curva de respuesta de la variable a controlar.

Partiendo de este hecho y de que en el proceso de diseño de un controlador complejo como lo es un PID, no se van a obtener resultados perfectos sino que por el contrario, se hacen necesarios ajustes de campo basándose en criterios ya definidos en la teoría del control automático, se toman los parámetros obtenidos como aproximaciones correctas.

## Capítulo 7

### Conclusiones y recomendaciones

---

#### 7.1 Conclusiones

- Con la introducción de la prensa al nuevo sistema de control y monitoreo CCM, se da un paso más en la estandarización de todo el equipo existente en la planta para realizar el proceso de fabricación de llantas, requisito planteado por la corporación a un mediano plazo.
- Debido a que el nuevo sistema con el que trabaja la prensa cuenta con una amplia gama de alarmas sumamente específicas, se tiene un mejor control de la producción y se evita el despacho de llantas defectuosas con mayor facilidad.
- Al contar la prensa con un sistema automatizado con PLC, se hace más fácil y puntual el arreglo de fallas de cualquier tipo.
- Al tener una prensa de este tipo introducida en el moderno sistema CCM, la conversión de las demás prensas iguales a esta será mucho más fácil y rápida.
- Al tener un monitoreo más riguroso en el proceso de vulcanizado, se garantiza una producción más confiable en cuanto a que se disminuye la cantidad de llantas scrap.
- Para la realización de un modelo de una planta térmica, se obtienen mejores resultados al hacerlo utilizando métodos empíricos y experimentales que utilizar el método teórico-matemático.
- La diferencia entre un modelo de segundo orden u orden superior con un modelo de primer orden, obtenidos mediante métodos empíricos, es lo suficientemente pequeña como para utilizar el modelo de primer orden.

- La correcta puesta a punto de un controlador desarrollado mediante cualquier método empírico, se logra a base de prueba y error en el campo.
- El método de obtención de modelos de plantas y controladores empíricamente de Ziegler –Nichols es mucho más sencillo y puntual que otros métodos existentes en este campo.
- Cualquier método empírico para la obtención de modelos de plantas reales, está sujeto a errores de tipo humano.
- La mayor limitante o causante de errores del método de Ziegler-Nichols es el hecho de tener que trazar una recta tangente al punto de inflexión de la curva de respuesta de la variable de proceso, debido a que esto da cabida a la subjetividad de quien realice el modelado, y con más razón si la curva presenta algún nivel de ruido.

## 7.2 Recomendaciones

A la luz de que el nuevo sistema al cual se introdujo la prensa, es flexible y moderno, se recomienda ampliar el desarrollo de la seguridad de acceso a ciertos sectores del sistema dependiendo del usuario y su grado de profundidad requerida en el sistema, empezando desde el nivel más básico de los operadores de las prensas, hasta el nivel superior, siendo éste el de los ingenieros de producción y el ingeniero responsable del proyecto CCM en la planta, pasando por los supervisores de vulcanización, los técnicos eléctricos de división 3, los ingenieros de mantenimiento y el personal del laboratorio.

Esto debido a que por ejemplo, actualmente cualquier persona puede reconocer y reiniciar cualquier falla o alarma desplegada en la pantalla de tacto del panel de control, siendo esto peligroso en el sentido de que se puede obviar un aspecto importante que no esté funcionando correctamente en el sistema o la prensa en sí, por parte de un usuario que no entienda la trascendencia de la alarma.

Con respecto al diseño del controlador PID, se recomienda, para efectos de afinamiento y de ahorrar tiempo en las próximas puestas en marcha que se realicen en prensas similares, que se elaboren no una sino varias tomas de datos de temperatura para la obtención de la curva de respuesta de la variable a controlar. Esto porque es preferible invertir tiempo en estas pruebas para cotejar varias tomas de datos entre sí para asegurar el comportamiento de la planta. Luego, mediante métodos estadísticos, obtener una curva que muestre de manera más confiable el comportamiento de la prensa ante el calentamiento con vapor de agua. De esta manera, se podría obtener un modelo más exacto y cercano a la realidad de la prensa, es decir, una aproximación más fiel para lograr obtener un PID más eficiente y que requiera menos trabajo a la hora de implementarlo en campo.

También se recomienda utilizar algún método capaz de “aprender” directamente de “observaciones” del comportamiento de la planta, tales como herramientas de software y redes neuronales.

## **Bibliografía**

---

1. Barrientos, Antonio y otros. **Control de Sistemas Continuos**. I Edición. McGraw-Hill Interamericana de España, S.A., España, 1996.
2. Ericsson, Kelvin y Hedrick, John. **Plantwide Process Control**. I Edición. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos de Norteamérica, 1999.
3. Kuo Benjamín. **Sistemas de Control Automático**. VII Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México, 1997.
4. Interiano, Eduardo. **Antología de Control Automático**. I Semestre 2004. Cartago, Costa Rica.
5. Núñez, A., Dorado, F., Camacho, E.F. y Bordóns, C. **Modelado y Control de un Horno de Yeso Rotativo y Contiuno**. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Sevilla, España. 2003.
6. Tacón, Eugenio y otros. **Controladores Basados en Estrategias PID**. I Edición. LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP. 2005.
7. Xian Sun, You y Dong Zhang, Wei. **Modified Smith Predictor for Controlling Integrator/Time Delay Processes**. Institute of Industrial Processes Control, Zhejiang University, Hangzhou, Republica de China. 1996.
8. Bridgestone Firestone (Canadá). **Bridgestone Joliette CCM System Functional Specification**. 1ed. Joliette, Canada, 2001.
9. “Norma técnica del seguro de riesgos del trabajo”. La Gaceta. (San José, Costa Rica), Enero, 1999.
10. Bridgestone Firestone (Estados Unidos). **Safety and Industrial Hygiene Procedures**. 1ed. Nasville, Tennessee, 1991.

11. National Instruments. "E/S Distribuidas". **Catálogo de Medición y Automatización 2003-2003**. p.p. 32,33. 2003.
12. Microchip Technology Inc. 18-pin Flash/EEPROM 8-Bit Microcontrollers [Disco]: PLC 16F8X.
13. León, Mauricio. **Kaizen. Filosofía cultural y ética de la mejora continua**. [www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger1/kaifilcullefco.htm](http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/ger1/kaifilcullefco.htm).
14. Solís, Daniel. Ing. Jefe de mantenimiento. Entrevista, Bridgestone Firestone de Costa Rica, Heredia, 3 de diciembre del 2004.
15. Villalobos, Gustavo. Ing. De sistemas de control y tecnologías de comunicación. Entrevista, Bridgestone Firestone de Costa Rica, Heredia, 6 de diciembre del 2004.
16. Céspedes, Gustavo. Ing. Jefe de división #3. Entrevista, Bridgestone Firestone de Costa Rica, Heredia, 6 de enero del 2005.
17. Vázquez, Cristhian. Técnico supervisor de división #3 (división encargada del área de vulcanizado). Entrevista, Bridgestone Firestone de Costa Rica, Heredia, 12 de enero del 2005.
18. Gutiérrez, Fernando. Ing. del área de salud ocupacional. Entrevista, Bridgestone Firestone de Costa Rica, Heredia, 11 de febrero del 2005.

### A.1 Glosario y abreviaturas

#### A.1.1 Glosario

- **Banco de la prensa:** sección de la prensa en donde se coloca la llanta verde.
- **Bladder:** vejiga de hule encargada del formado de la llanta durante el ciclo de curado.
- **Conveyor:** banda transportadora.
- **Curado:** proceso físico-químico que le brinda a la llanta las propiedades finales.
- **Encoder:** decodificador de posición en grados por giro.
- **Escaleras:** término usado para referirse a la programación de los PLC's. Cada escalera o ladder es un archivo en del programa.
- **Delastomer:** tipo de tela utilizada en la fabricación de llantas.
- **Kaizen:** palabra japonesa que encierra el concepto de mejoramiento continuo.
- **Llanta verde:** llanta sin vulcanizar.
- **Negro de humo:** químico en polvo utilizado en la fabricación de llantas de automotores.
- **Platten:** pieza metálica con un ducto interno por donde pasa el vapor de agua. En esta pieza se sientan los moldes para calentarlos por conducción térmica.
- **Rung:** o escalón. Es una sección de una escalera de un programa de PLC.

- **Scrap:** nombre que se le da a las llantas que no cumplen con las especificaciones de curado requeridas por el departamento de laboratorio y el departamento de calidad.
- **Temperatura de Jacket:** temperatura de la parte superior de un molde segmentado.
- **Vulcanizado:** proceso físico-químico que le brinda a la llanta las propiedades finales.
- **VX:** ducto flexible por donde se pasan cables para realizar un cableado de campo. Esta hecho a base de una espiral de metal forrada con material aislante.

### **A.1.2 Abreviaturas**

- **CCM:** Computer Code Monitor
- **ISO:** Internacional Standard Organization
- **PLC:** Programmable Logic Controler

## A.2 Monitoreo de las temperaturas de los platten

Tabla A.2.1 Muestreo de las temperaturas de los platten

t (s)	Temp A (°C)	Temp B (°C)	t (s)	Temp A (°C)	Temp B (°C)	t (s)	Temp A (°C)	Temp B (°C)
0	115	118	92	159	169	184	180	188
2	115	118	94	160	169	186	180	188
4	115	118	96	161	170	188	180	188
6	115	118	98	161	171	190	181	189
8	115	118	100	162	172	192	181	189
10	115	118	102	163	172	194	181	189
12	115	118	104	163	173	196	181	189
14	115	118	106	164	173	198	182	189
16	116	119	108	164	174	200	182	189
18	116	119	110	165	175	202	182	190
20	117	120	112	166	175	204	182	190
22	118	122	114	166	176	206	183	190
24	119	123	116	167	176	208	183	190
26	120	124	118	167	177	210	183	190
28	122	126	120	168	177	212	183	190
30	123	128	122	168	178	214	183	190
32	124	129	124	169	178	216	184	190
34	126	131	126	169	179	218	184	190
36	127	132	128	170	179	220	184	190
38	129	134	130	170	179	222	184	191
40	130	136	132	171	180	224	184	191
42	132	137	134	171	180	226	185	191
44	133	139	136	172	181	228	185	191
46	134	141	138	172	181	230	185	191
48	136	142	140	172	182	232	185	191
50	137	144	142	173	182	234	185	191
52	139	145	144	173	182	236	185	191
54	140	147	146	174	183	238	185	191
56	141	148	148	174	183	240	186	191
58	142	150	150	175	183	242	186	192
60	144	151	152	175	184	244	186	192
62	145	153	154	175	184	246	186	192
64	146	154	156	176	184	248	186	192
66	147	155	158	176	185	250	186	192
68	149	157	160	176	185	252	186	192
70	150	158	162	177	185	254	186	192
72	151	159	164	177	186	256	186	192
74	152	160	166	177	186	258	186	192
76	153	161	168	178	186	260	187	192
78	154	162	170	178	187	262	187	192
80	155	163	172	178	187	264	187	192
82	155	164	174	179	187	266	187	192
84	156	165	176	179	187	268	187	193
86	157	166	178	179	187	270	187	193
88	158	167	180	179	188	272	187	193
90	159	168	182	180	188	274	187	193

t (s)	Temp A (°C)	Temp B (°C)	t (s)	Temp A (°C)	Temp B (°C)	t (s)	Temp A (°C)	Temp B (°C)
276	187	193	376	191	195	476	193	196
278	188	193	378	191	195	478	193	196
280	188	193	380	191	195	480	193	196
282	188	193	382	191	195	482	193	196
284	188	193	384	191	195	484	193	196
286	188	193	386	191	195	486	193	196
288	188	193	388	191	195	488	193	196
290	188	193	390	191	195	490	193	196
292	188	193	392	191	195	492	193	196
294	189	193	394	191	195	494	193	196
296	189	193	396	191	195	496	193	196
298	189	193	398	192	195	498	193	196
300	189	193	400	192	195	500	193	196
302	189	193	402	192	195	502	193	196
304	189	193	404	192	195	504	193	196
306	189	193	406	192	195	506	193	196
308	189	194	408	192	195	508	193	196
310	189	194	410	192	196	510	193	196
312	189	194	412	192	196	512	193	196
314	189	194	414	192	196	514	193	196
316	189	194	416	192	196	516	193	196
318	189	194	418	192	196	518	193	196
320	189	194	420	192	196	520	193	196
322	189	194	422	192	196	522	193	196
324	189	194	424	192	196	524	193	196
326	189	194	426	192	196	526	193	196
328	189	194	428	192	196	528	193	196
330	189	194	430	192	196	530	193	196
332	189	194	432	192	196	532	193	196
334	189	194	434	192	196	534	193	196
336	189	194	436	192	196	536	193	196
338	189	194	438	192	196	538	193	196
340	190	194	440	192	196	540	193	196
342	190	194	442	192	196	542	193	197
344	190	194	444	192	196	544	193	197
346	190	195	446	192	196	546	193	197
348	190	195	448	192	196	548	193	197
350	190	195	450	192	196	550	193	197
352	190	195	452	192	196	552	194	197
354	190	195	454	192	196	554	194	197
356	190	195	456	193	196	556	194	197
358	190	195	458	193	196	558	194	197
360	190	195	460	193	196	560	194	196
362	190	195	462	193	196	562	194	196
364	190	195	464	193	196	564	194	196
366	190	195	466	193	196	566	194	196
368	190	195	468	193	196	568	194	196
370	191	195	470	193	196	570	194	196
372	191	195	472	193	196	572	194	196
374	191	195	474	193	196	574	194	196

<b>t (s)</b>	<b>Temp A (°C)</b>	<b>Temp B (°C)</b>
576	194	196
578	194	196
580	194	196
582	194	196
584	194	196
586	194	196
588	194	196
590	194	196
592	194	196
594	194	196
596	194	196
598	194	196
600	194	196



CURE ORDER : Running  
MOLD TEMP. : 177,0 °C  
GT TEMP. : INN TREAD : 0 °C  
DEF.TIME : 10,48 min

ROOM TEMP : 35,0 °C  
P.OPEN.TIME : 0 MIN  
SURFACE : 0,0 °C

LOCATION	GUM		MEAS DATA				SPEC			LCT CK
	GUMNo.	CBP	DEF CEF	TOTAL CEQ	MAX TEMP.	DEF CEF	TOTAL CEQ	MAX. TEMP.		
BFB		1,0	17,45	21,65	175,9	0.3min	23max			
PSWB		1,0	18,96	22,82	175,4	.45min	38max			
2BEB		1,0	12,42	16,70	173,4	0.4min	10.5-23			
UTSB		1,0	13,92	17,86	173,5	0.3min	10.5min			
BPC		1,0	20,70	24,58	175,8	.45min	10.5min			
SPC		1,0	19,69	23,77	176,3	.35min	10.5min			
TS		1,0	15,78	19,95	175,0	0.3min	24max			
UTS		1,0	16,92	20,76	174,6	0.3min	10.5min			
2BE		1,0	14,40	18,31	173,5	0.4min	10.5-23			
PSW		1,0	15,29	19,00	173,9	.45min	38max			
PRL		1,0	19,42	23,19	175,9	.45min	23max			
BF		1,0	16,32	20,50	175,8	0.3min	23max			

COMMENT

( 1P S/W TOP-BOT  
TEMP.DEFF. °C )

**Tabla A.3.1** Temperaturas muestreadas durante la prueba de termocuplas

Ch.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
LOCATION	BFB	PSWB	2BEB	UTSB	BPC	SPC	TS	UTS	2BE	PSW	PRL	BF
CLASS of BLOWPOINT	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Initial Temp	39,9	42,2	39,0	38,6	39,1	39,2	37,0	36,8	35,3	35,9	38,7	37,9
0,00 TEMP.	80,2	64,4	53,2	44,3	77,0	64,7	71,4	65,7	45,2	45,5	65,0	56,8
CE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,15 TEMP.	144,4	148,9	103,5	94,4	147,1	149,9	146,6	145,0	81,5	72,2	147,0	120,2
CE	0,05	0,06	0,00	0,00	0,06	0,07	0,05	0,05	0,00	0,00	0,06	0,01
0,30 TEMP.	149,5	158,1	120,4	126,0	157,9	156,0	151,5	153,3	134,8	131,1	155,3	139,0
CE	0,17	0,24	0,01	0,02	0,23	0,24	0,19	0,19	0,03	0,02	0,21	0,06
0,45 TEMP.	152,6	160,5	127,7	136,0	161,3	158,5	153,0	156,0	144,1	142,6	158,5	144,6
CE	0,32	0,48	0,05	0,07	0,48	0,46	0,36	0,38	0,11	0,09	0,43	0,15
1,00 TEMP.	154,9	162,1	133,4	142,4	163,6	160,4	154,4	158,0	149,4	149,3	160,8	148,3
CE	0,50	0,75	0,09	0,14	0,76	0,70	0,53	0,59	0,23	0,21	0,67	0,27
1,15 TEMP.	156,4	163,1	137,1	146,3	165,4	161,6	155,3	159,1	152,4	152,9	162,4	150,6
CE	0,70	1,04	0,15	0,25	1,08	0,96	0,72	0,82	0,38	0,36	0,94	0,41
1,30 TEMP.	157,9	164,0	140,8	149,5	166,9	163,0	156,3	160,1	154,8	155,6	163,9	153,0
CE	0,91	1,34	0,23	0,38	1,42	1,25	0,92	1,07	0,56	0,54	1,24	0,57
1,45 TEMP.	159,0	164,6	143,5	152,0	168,0	164,0	157,1	161,0	156,4	157,5	165,0	154,9
CE	1,14	1,66	0,32	0,53	1,80	1,55	1,13	1,32	0,75	0,75	1,56	0,75
2,00 TEMP.	160,1	165,4	146,3	154,0	169,0	165,0	158,0	161,6	157,9	159,3	166,1	156,5
CE	1,39	1,98	0,43	0,70	2,19	1,86	1,35	1,59	0,97	0,98	1,89	0,95
2,15 TEMP.	161,1	165,9	148,3	155,6	169,8	166,0	158,9	162,1	158,9	160,4	167,0	158,0
CE	1,65	2,32	0,56	0,89	2,60	2,20	1,58	1,87	1,20	1,23	2,25	1,16
2,30 TEMP.	162,3	166,5	150,5	157,3	170,5	167,0	159,8	162,9	160,0	161,6	168,0	159,5
CE	1,92	2,67	0,70	1,09	3,02	2,55	1,82	2,15	1,44	1,49	2,62	1,39
2,45 TEMP.	163,0	166,9	152,0	158,5	171,1	167,6	160,5	163,4	160,9	162,5	168,5	160,6
CE	2,21	3,02	0,85	1,32	3,46	2,92	2,07	2,45	1,70	1,77	3,00	1,65
3,00 TEMP.	164,1	167,5	154,0	159,8	171,8	168,5	161,5	164,0	161,8	163,5	169,4	162,0
CE	2,51	3,39	1,02	1,56	3,92	3,30	2,34	2,75	1,97	2,07	3,40	1,91
3,15 TEMP.	164,9	168,0	155,4	160,8	172,3	169,3	162,1	164,5	162,5	164,0	169,9	163,0
CE	2,83	3,77	1,21	1,81	4,39	3,70	2,61	3,07	2,25	2,37	3,82	2,20
3,30 TEMP.	165,8	168,8	157,0	161,8	172,8	170,0	163,0	165,1	163,1	164,9	170,5	164,1
CE	3,16	4,15	1,41	2,08	4,87	4,12	2,90	3,39	2,54	2,69	4,25	2,50
3,45 TEMP.	166,5	169,4	158,3	162,5	173,0	170,5	163,6	165,9	163,8	165,4	171,0	165,0
CE	3,51	4,56	1,63	2,36	5,36	4,54	3,20	3,73	2,84	3,02	4,68	2,82

6,15	TEMP. CE	172,3 7,68	173,5 9,18	166,5 4,56	168,4 5,77	174,8 10,56	174,5 9,43	170,0 6,84	171,4 7,73	168,4 6,33	169,8 6,80	174,0 9,55	171,8 6,82
6,30	TEMP. CE	172,8 8,16	173,8 9,69	167,0 4,92	168,8 6,16	175,0 11,10	174,8 9,97	170,5 7,27	171,8 8,19	168,8 6,72	170,1 7,22	174,0 10,07	172,1 7,28
6,45	TEMP. CE	173,0 8,65	173,9 10,21	167,5 5,28	169,0 6,56	175,0 11,64	174,9 10,51	170,9 7,71	172,0 8,66	169,0 7,12	170,4 7,65	174,1 10,59	172,5 7,76
7,00	TEMP. CE	173,5 9,15	174,0 10,72	168,0 5,66	169,5 6,97	175,0 12,19	175,0 11,05	171,4 8,16	172,5 9,13	169,4 7,53	170,6 8,08	174,3 11,11	172,9 8,24
7,15	TEMP. CE	173,8 9,66	174,1 11,24	168,6 6,05	169,9 7,39	175,1 12,73	175,3 11,60	171,6 8,61	172,6 9,61	169,6 7,94	171,0 8,52	174,5 11,64	173,1 8,74
7,30	TEMP. CE	174,0 10,17	174,4 11,77	169,1 6,44	170,1 7,81	175,3 13,28	175,4 12,15	172,0 9,08	173,0 10,10	170,0 8,36	171,1 8,97	174,5 12,17	173,5 9,24
7,45	TEMP. CE	174,3 10,69	174,5 12,30	169,5 6,85	170,5 8,24	175,4 13,84	175,5 12,71	172,4 9,55	173,1 10,59	170,3 8,78	171,4 9,42	174,6 12,70	173,8 9,74
8,00	TEMP. CE	174,5 11,22	174,6 12,83	170,0 7,27	170,8 8,67	175,5 14,40	175,6 13,27	172,6 10,03	173,4 11,09	170,5 9,21	171,6 9,88	174,8 13,24	174,0 10,26
8,15	TEMP. CE	174,8 11,76	174,8 13,36	170,5 7,70	171,0 9,12	175,5 14,95	175,8 13,83	173,0 10,52	173,5 11,60	170,9 9,65	171,9 10,34	175,0 13,78	174,3 10,78
8,30	TEMP. CE	175,0 12,30	174,9 13,90	170,8 8,13	171,3 9,57	175,5 15,51	175,9 14,40	173,1 11,01	173,6 12,10	171,1 10,10	172,0 10,81	175,0 14,32	174,4 11,31
8,45	TEMP. CE	175,1 12,84	175,0 14,45	171,1 8,58	171,5 10,02	175,6 16,07	176,0 14,97	173,5 11,51	173,9 12,61	171,4 10,55	172,4 11,28	175,1 14,87	174,5 11,84
9,00	TEMP. CE	175,3 13,39	175,0 14,99	171,1 9,02	171,8 10,48	175,6 16,63	176,0 15,55	173,6 12,02	174,0 13,13	171,5 11,00	172,5 11,76	175,1 15,41	174,8 12,37
9,15	TEMP. CE	175,4 13,95	175,1 15,54	171,5 9,48	172,0 10,94	175,6 17,19	176,0 16,12	173,9 12,53	174,0 13,65	171,8 11,46	172,6 12,24	175,3 15,96	174,9 12,91
9,30	TEMP. CE	175,5 14,50	175,3 16,09	171,8 9,94	172,1 11,41	175,6 17,75	176,0 16,69	174,0 13,04	174,1 14,17	171,9 11,92	172,6 12,72	175,4 16,52	175,0 13,45
9,45	TEMP. CE	175,6 15,06	175,4 16,64	172,0 10,40	172,4 11,89	175,8 18,32	176,0 17,26	174,1 13,56	174,3 14,69	172,0 12,39	172,9 13,21	175,4 17,07	175,0 14,00
10,00	TEMP. CE	175,8 15,63	175,4 17,20	172,4 10,87	172,5 12,37	175,8 18,88	176,1 17,84	174,3 14,09	174,4 15,22	172,3 12,86	173,0 13,70	175,5 17,63	175,1 14,55
10,15	TEMP. CE	175,8 16,19	175,4 17,75	172,5 11,35	172,6 12,85	175,8 19,45	176,1 18,41	174,5 14,61	174,5 15,75	172,5 13,34	173,1 14,19	175,5 18,19	175,4 15,10
10,30	TEMP. CE	175,9 16,76	175,3 18,31	172,8 11,84	172,9 13,33	175,8 20,02	176,3 18,99	174,5 15,15	174,5 16,28	172,6 13,82	173,3 14,69	175,5 18,75	175,5 15,65
10,45	TEMP. CE	175,9 17,33	175,1 18,86	172,9 12,32	173,0 13,82	175,8 20,58	176,3 19,57	174,6 15,68	174,6 16,81	172,8 14,31	173,4 15,19	175,5 19,31	175,5 16,21
10,48 (DEF)	TEMP. CE	175,9 17,45	175,1 18,96	172,9 12,42	173,0 13,92	175,6 20,70	176,3 19,69	174,6 15,78	174,6 16,92	172,9 14,40	173,5 15,29	175,6 19,42	175,5 16,32
11,03	TEMP. CE	175,9 18,02	175,1 19,51	173,1 12,91	173,1 14,42	175,8 21,26	176,3 20,27	174,8 16,32	174,6 17,45	173,0 14,90	173,5 15,79	175,6 19,98	175,6 16,88
11,18	TEMP. CE	175,8 18,58	175,0 20,06	173,1 13,41	173,3 14,91	175,8 21,83	176,3 20,85	174,9 16,86	174,6 17,98	173,1 15,39	173,6 16,30	175,8 20,54	175,6 17,44
11,33	TEMP. CE	175,6 19,15	174,8 20,60	173,3 13,91	173,4 15,41	175,8 22,39	176,3 21,43	175,0 17,40	174,6 18,52	173,3 15,89	173,8 16,81	175,8 21,11	175,6 18,00
11,48	TEMP. CE	175,5 19,71	174,3 21,13	173,4 14,41	173,5 15,92	175,8 22,96	176,3 22,01	175,0 17,95	174,3 19,05	173,4 16,39	173,9 17,32	175,9 21,68	175,8 18,57
12,03	TEMP. CE	175,4 20,26	173,9 21,65	173,1 14,91	172,3 16,41	170,8 23,46	173,4 22,55	175,0 18,49	174,0 19,57	173,5 16,89	170,6 17,80	171,9 22,19	174,3 19,11
12,18	TEMP. CE	171,0 20,76	168,1 22,10	171,5 15,38	168,5 16,84	164,0 23,84	166,6 22,98	171,0 18,99	167,4 20,01	169,5 17,35	165,5 18,18	164,5 22,59	168,9 19,58
12,33	TEMP. CE	163,5 21,14	159,8 22,42	170,1 15,82	165,5 17,20	160,0 24,12	161,4 23,29	164,8 19,37	159,4 20,32	164,6 17,71	161,8 18,49	153,9 22,83	164,1 19,93

12,48	TEMP. CE	157,1 21,39	152,9 22,62	168,5 16,23	162,9 17,52	156,8 24,35	156,9 23,53	160,4 19,66	155,3 20,53	161,0 18,01	157,9 18,74	151,8 23,00	159,9 20,21
13,03	TEMP. CE	155,0 21,60	149,9 22,78	167,0 16,61	160,5 17,79	152,0 24,53	153,3 23,72	157,5 19,90	152,5 20,71	158,5 18,25	155,5 18,95	149,0 23,15	156,9 20,44
13,07 (WAIT)	TEMP. CE	154,5 21,65	149,5 22,82	166,6 16,70	159,8 17,86	150,8 24,58	152,9 23,77	156,8 19,95	151,8 20,76	157,8 18,31	154,9 19,00	147,9 23,19	156,0 20,50
	MAX.TEMP. DEF.TEMP.	175,9 175,9	175,4 175,1	173,4 172,9	173,5 173,0	175,8 175,6	176,3 176,3	175,0 174,6	174,6 174,6	173,5 172,9	173,9 173,5	175,9 175,6	175,8 175,5
	DEF.CEF. TOTAL CEQ.	17,45 21,65	18,96 22,82	12,42 16,70	13,92 17,86	20,70 24,58	19,69 23,77	15,78 19,95	16,92 20,76	14,40 18,31	15,29 19,00	19,42 23,19	16,32 20,50

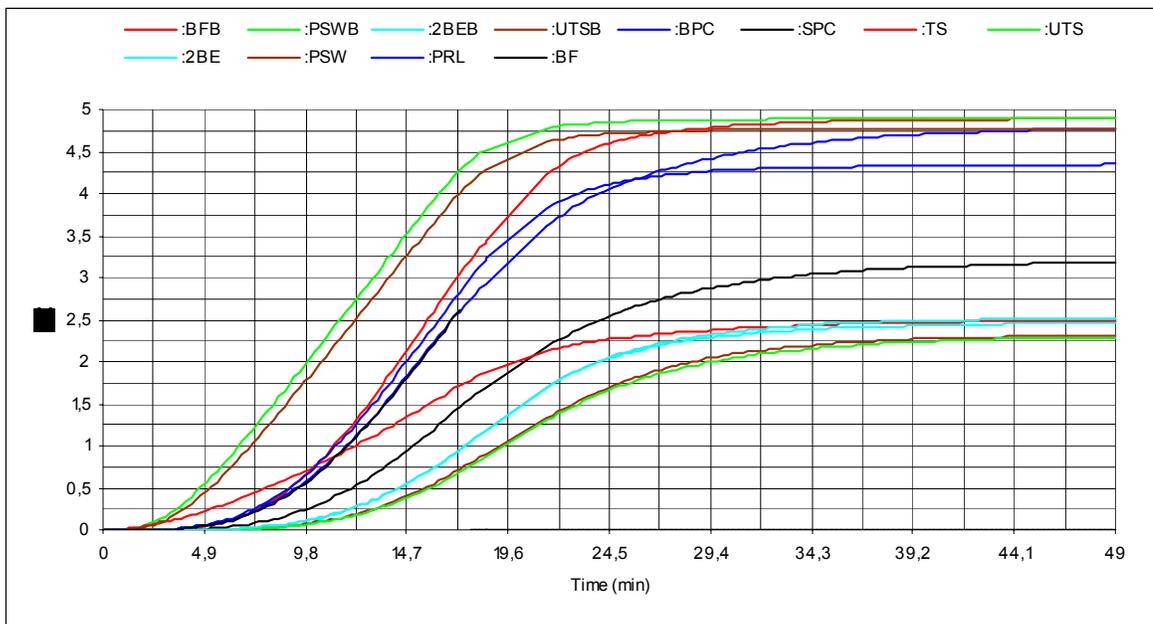


Figura A.3.1 Curvas de las diferentes temperaturas de la prueba de termocuplas

#### **A.4 Descripción de la empresa**

En mayo de 1967 inicia sus operaciones en territorio costarricense la compañía FIRESTONE, con una producción diaria de 425 llantas y con la participación de 200 trabajadores en labores de producción, ventas y administración.

En diciembre de 1985, la Compañía FIRESTONE vende sus acciones en Costa Rica a un grupo de empresarios nacionales, cambiando así su razón social a INDUSTRIA AKRON DE COSTA RICA, S.A. pero siempre fabricando productos bajo licencia FIRESTONE.

En enero de 1995 la Compañía realiza una alianza estratégica con la corporación BRIDGESTONE / FIRESTONE, la mayor fabricante de llantas a nivel mundial.

Para el año 1997 se logra la certificación ISO 9002 y dos años después la certificación ISO 14001, con lo cual queda demostrado el fuerte compromiso de la compañía con la calidad y con el medio ambiente. En este mismo año se inaugura la planta subsidiaria, de FIRESTONE DE COSTA RICA, bajo el nombre de Llantas de Centroamérica (LLACASA).

A raíz de la unión con la corporación, BRIDGESTONE FIRESTONE, FIRESTONE DE COSTA RICA, S.A., cambia su razón social a BRIDGESTONE FIRESTONE DE COSTA RICA, S.A., esto se da en Octubre de 1999.

Actualmente la empresa fabrica más de 5000 llantas diarias contando con la participación de aproximadamente 630 colaboradores, pero además de llantas se fabrican bandas de recauche, material para reparaciones y cementos, productos que se comercian en Estados Unidos, Centro América y otras latitudes.