

**AUTOMATIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DILATÓMETRO DE  
CARBÓN AUDIBERT-ARNU**

**JOSÉ DAVID MANTILLA GÓMEZ  
DUBIAN YAMID JÁUREGUI PACHECO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2010**

**AUTOMATIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DILATÓMETRO DE  
CARBÓN AUDIBERT-ARNU**

**JOSÉ DAVID MANTILLA GÓMEZ  
DUBIAN YAMID JÁUREGUI PACHECO**

**Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico**

**Director**

**Msc. JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2010**

A Dios por todas las cosas maravillosas que ha puesto en mi vida, especialmente mis seres más queridos: mi familia y mis amigos.

**JOSÉ DAVID MANTILLA G.**

A mi familia por el apoyo incondicional que me brindó durante el transcurso de mi desarrollo profesional.

**DUBIAN YAMID JÁUREGUI**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su gratitud a:

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, por toda la colaboración dispuesta.

Al profesor Jaime Guillermo Barrero Pérez, director del proyecto, por la orientación y la amabilidad brindada.

A la Universidad Industrial de Santander, por los años de formación profesional dedicados.

A todas las personas que de una u otra manera ayudaron con la elaboración del proyecto.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN .....  | 15 |
| 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....   | 16 |
| 1.1 OBJETIVOS.....  | 16 |
| 1.1.1 Generales. ....   | 16 |
| 1.1.2 Específicos.....  | 16 |
| 1.2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....                                   | 16 |
| 2. DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU .....                                | 18 |
| 2.1 DILATOMETRÍA .....  | 18 |
| 2.2 REFERENCIAS DEL PROYECTO ANTERIOR .....                                 | 20 |
| 2.2.1 Sistema de adquisición de imágenes y registro de desplazamiento ..... | 21 |
| 2.2.2 Control de temperatura .....  | 24 |
| 2.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO .....  | 25 |
| 2.3.1 Horno Eléctrico .....   | 25 |
| 2.3.2 Instrumentos de regulación y control de la temperatura .....          | 25 |
| 2.3.3 Sistema de adquisición de imágenes y registro de desplazamiento ..... | 26 |
| 3. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....                     | 27 |
| 3.1 ADQUISICIÓN .....   | 27 |
| 3.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....                                  | 28 |
| 4. SISTEMA DE CONTROL DE GRADIENTE DE TEMPERATURA DEL HORNO<br>.....        | 37 |
| 4.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA .....   | 38 |
| 4.1.1 Planta.....   | 38 |
| 4.1.2 Sensor.....   | 40 |
| 4.1.3 Acondicionador. ....  | 41 |
| 4.1.3.1 AD595.....  | 41 |
| 4.1.3.2 Filtro pasa bajas.....  | 44 |
| 4.1.3.3 Circuito de zona muerta.....  | 47 |

|  |    |
|--|----|
| 4.1.3.4 ADC .....                              | 48 |
| 4.1.3.5 Comunicación vía USB .....             | 49 |
| 4.1.4 Controlador .....                        | 51 |
| 4.1.5 Preaccionador .....                      | 52 |
| 4.1.5.1 MC9S08JM60. ....                       | 52 |
| 4.1.5.2 Detector cruce por cero.....           | 53 |
| 4.1.5.2 Circuito de disparo. ....              | 54 |
| 4.1.6 Esquema general.....                     | 59 |
| 4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA.....           | 60 |
| 5. RESULTADOS.....                             | 67 |
| 5.1 SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO..... | 67 |
| 5.2 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....     | 69 |
| 5.3 CURVA DE DILATOMETRÍA.....                 | 72 |
| 6. OBSERVACIONES.....                          | 73 |
| 7. CONCLUSIONES .....                          | 75 |
| 8. RECOMENDACIONES.....                        | 77 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                              | 78 |
| ANEXOS.....                                    | 80 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de los sistemas de adquisición de imágenes, registro de desplazamiento y control de temperatura. .... | 17 |
| Figura 2. Curva Dilatómetrica Típica.....   | 19 |
| Figura 3. Esquema simplificado del Dilatómetro Audibert-Arnu.....   | 20 |
| Figura 4. Diagrama de flujo proyecto predecesor .....   | 22 |
| Figura 5. Efecto de variar las condiciones de iluminación .....   | 29 |
| Figura 6. Resultado de utilizar <i>Pattern Matching</i> .....   | 31 |
| Figura 7. Representación espacial del píxel (0,0). ....   | 33 |
| Figura 8. Cuadrícula de puntos utilizada en la calibración de imágenes .....  | 35 |
| Figura 9. Diagrama de flujo implementado y código en <i>Lab View</i> .....  | 36 |
| Figura 10. Representación en diagrama de bloques del sistema. ....  | 38 |
| Figura 11. Perfil de temperatura del horno expuesto a 220 Vrms.....   | 39 |
| Figura 12. Temperatura del horno al enfriamiento. ....  | 40 |
| Figura 13. Diagrama de bloques de acondicionamiento de la señal.....  | 41 |
| Figura 14. Diagrama de bloques y conexión del circuito integrado AD595.....   | 42 |
| Figura 15. Comparación temperatura real vs temperatura del AD595.....   | 44 |
| Figura 16. Circuito esquemático filtro pasa bajas .....   | 45 |
| Figura 17. Respuesta en frecuencia de filtro pasa bajas. Arriba barrido logarítmico, abajo barrido lineal. ....         | 46 |
| Figura 18. Topología del circuito de Zona muerta con salida positiva, con voltaje de referencia de 2.5V.....            | 47 |
| Figura 19. Barrido en DC de circuito de zona muerta .....   | 48 |
| Figura 20. Comunicación con microcontrolador desde VI de <i>Lab View</i> . ....   | 50 |
| Figura 21. Algoritmo en <i>Lab View</i> para control del sistema. ....  | 51 |
| Figura 22. Esquema de circuito detector de cruce por cero.....  | 53 |
| Figura 23. Ondas de entrada y salida de circuito detector de cruce por cero. ....                                       | 54 |
| Figura 24. Diagrama de tiempos de señales en microcontrolador.....  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 25. Circuito de disparo para el actuador. ....  | 56 |
| Figura 26. Voltaje rms entregado a la carga en función del ángulo de disparo del TRIAC. .... | 57 |
| Figura 27. Ángulo de disparo en función del voltaje RMS requerido. ....                      | 58 |
| Figura 28. Comportamiento Temperatura según variación ángulo de disparo. ....                | 59 |
| Figura 29. Diagrama de flujo de señales. ....  | 59 |
| Figura 30. Respuesta del sistema a un escalón de 72 Vrms ....                                | 61 |
| Figura 31. Respuesta de la planta a un escalón de 120,4 Vrms.....                            | 62 |
| Figura 32. Comportamiento inicial de la planta como respuesta a un escalón. ....             | 63 |
| Figura 33. Ajuste de curva de caracterización a función exponencial.....                     | 64 |
| Figura 34. Ubicación de parámetros para aplicar método Zieger-Nichols. ....                  | 65 |
| Figura 35. Medición del tiempo de respuesta del sistema ....                                 | 68 |
| Figura 36. Gradiente de temperatura obtenido con controlador proporcional. ....              | 70 |
| Figura 37. Temperatura de planta vs salida deseada en los primeros segundos. ....            | 70 |
| Figura 38. Curva de dilatometría para 4 muestras de carbón.....                              | 72 |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Función de <i>End points</i> en comunicación <i>USB</i> . ..... | 49 |
| Tabla 2. Parámetros del controlador. ....                                | 65 |
| Tabla 3. Cálculo de los parámetros del controlador. ....                 | 66 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| Anexo 1: Procesamiento digital de imágenes .....       | 81 |
| Anexo 2: Tablas sistema de control de temperatura..... | 89 |
| Anexo 3. Programa principal microcontrolador .....     | 92 |

## RESUMEN

**TÍTULO:** AUTOMATIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU\*.

**AUTORES:** José David Mantilla Gómez  
Dubian Yamid Jáuregui Pacheco\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu, Sistema de Adquisición de Imágenes, *Imaq Vision*, Reconocimiento de Patrones, Operaciones de Morfología y Segmentación, *Lab View*, Sistemas de Control, Microcontroladores, Control AC de Línea, Controlador PID.

### DESCRIPCIÓN:

En este proyecto se diseñaron e implementaron los sistemas de registro de desplazamiento y control de temperatura para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu, del laboratorio de corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Las medidas dilatométricas realizan la caracterización de las propiedades plásticas de diferentes tipos de carbón y tienen como fin dar una apreciación de la aptitud a la coquización de los mismos.

El dilatómetro fue automatizado algunos años atrás<sup>1</sup>. Se decidió llevar a cabo un rediseño global buscando un mejor desempeño del sistema en general, partiendo de 2 premisas primordiales: modernización y robustez.

La medición del desplazamiento se efectúa con un sistema de adquisición de imágenes conformado por una cámara de video, un lente y un *frame grabber*. La librería *Imaq Vision* de *Lab View* además de realizar el procesamiento adecuado a las imágenes, calcula y registra las variaciones en la posición de cada una de las muestras de carbón.

La temperatura del proceso es leída por una termocupla tipo K y el circuito integrado AD595. Esta señal ingresa al ADC de un microcontrolador, el cual transmite el dato a un computador encargado del proceso de control. El protocolo de comunicación es el USB.

El PC recibe los datos procedentes tanto del sistema de adquisición de imágenes como del sistema de control de temperatura y efectúa las funciones de controlador del sistema en general. Realizando un control PID, calculando el ángulo de disparo, enviándolo por el microcontrolador, para un control AC de línea que modifica el valor eficaz de la tensión aplicada sobre el horno.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad Físico Mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Msc. Jaime Guillermo Barrero.

## ABSTRACT

**TITLE:** PERFORMANCE AUTOMATES FOR AUDIBERT-ARNU COAL DILATOMETER\*.

**AUTHORS:** José David Mantilla Gómez  
Dubian Yamid Jáuregui Pacheco\*\*

**KEY WORDS:** Audibert-Arnu Coal Dilatometer, Image Acquisition System, Imaq Vision, Pattern Matching, Morphological and Segmentation Operations, Lab View, Control Systems, Microcontrollers, AC Line Control, PID Control.

### DESCRIPTION:

In this project was designed and implemented a displacement register system and a temperature control for Audibert-Arnu Coal Dilatometer, which is located on the Corrosion Laboratory at "Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales".

The equipment measurement finds out the plastic properties characterization of diverse coal types, and they determine its aptitude to be used in the coke production.

The equipment was automated some years ago<sup>2</sup>. The decision was to make a global redesign, looking forward to improving a better general system performance, starting with two fundamental aspects: modernization and robustness.

The displacement measure was developed with an image acquisition system which is conformed by a video camera, a lens and a frame grabber. Lab View's Imaq Vision Library does the suitable image processing; besides, it calculates and registers the position variations of each coal sample.

The temperature is read by a K type thermocouple and the integrated circuit AD595. This signal goes to a microcontroller ADC, and later is transmitted to a computer, which is in charge of the control process. The communication protocol is USB.

Finally, the PC gets the data from the image acquisition and the temperature control systems and carries out the control functions of the general system. The PID actions calculate the shot angle for an AC line control that modifies the rms voltage value applied over the kiln.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad Físico Mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Msc. Jaime Guillermo Barrero.

## INTRODUCCIÓN

El dilatómetro de carbón Audibert-Arnu de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, se encontraba fuera de servicio debido a inconvenientes en los sistemas de registro de desplazamiento y control de temperatura, planteados y desarrollados en un trabajo anterior. Debido a ello, resultaba imposible realizar la caracterización de las propiedades plásticas de diferentes tipos de carbón, de tal forma que se permitiera determinar su aptitud para ser empleados en la fabricación de coque metalúrgico, la cual es la razón de ser del equipo.

En años recientes, la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales ha venido efectuando proyectos de distintas índoles en asocio con la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, ya sea para restaurar y/o modernizar algunos equipos existentes en los laboratorios o para diseñar e implementar prototipos para aplicaciones específicas.

Los grandes avances tecnológicos logrados en la adquisición de imágenes y el poder de procesamiento de datos de los equipos actuales, han permitido que el tratamiento digital de imágenes ayude a estudiar fenómenos y procesos, que resultan difíciles de analizar a través de los métodos convencionales de medida. Las nuevas técnicas y dispositivos utilizados en este campo, han podido incursionar en otras áreas de la ciencia donde se han obtenido importantes avances, como en la medicina, la astronomía, la geología, entre otras. El área de la automatización aprovecha estas herramientas para dar alternativas a la hora de medir y controlar las diferentes variables de un proceso.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.1 OBJETIVOS

**1.1.1 Generales.** Automatizar el funcionamiento del dilatómetro de carbón Audibert-Arnu de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, controlando la temperatura del carbón y midiendo su desplazamiento.

### 1.1.2 Específicos

- Utilizar el procesamiento digital de imágenes para realizar la medición del desplazamiento de los pistones del dilatómetro de carbón Audibert-Arnu.
- Diseñar e implementar un sistema de control de la temperatura utilizando una termocupla, un triac y un PC para, de manera robusta, permitir la operación automática del dilatómetro.

### 1.2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En este proyecto se diseñaron e implementaron los sistemas de registro de desplazamiento y control de temperatura para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu. Las medidas dilatométricas realizan la caracterización de las propiedades plásticas de diferentes tipos de carbón y tienen como fin dar una apreciación de la aptitud a la coquización de los mismos. La figura 1, muestra el esquema del sistema desarrollado.

La medición del desplazamiento se realiza a través de 2 sistemas: el primero, el de adquisición de imágenes, que consta de una cámara de video, un lente y un *frame grabber*; el segundo, es un sistema de procesamiento de las imágenes obtenidas, que calcula y realiza el registro de las variaciones en la posición.

La temperatura del proceso es leída a través de una termocupla tipo K y el circuito integrado AD595 (que corrige los errores en la medición). Esta señal es enviada a un microcontrolador, el cual transmite los datos mediante el protocolo USB a un computador. El PC efectúa las funciones de controlador del sistema en general. Implementando un control PID, se calcula el ángulo de disparo para un control AC de línea que modifica la tensión eficaz que se aplica sobre el horno.

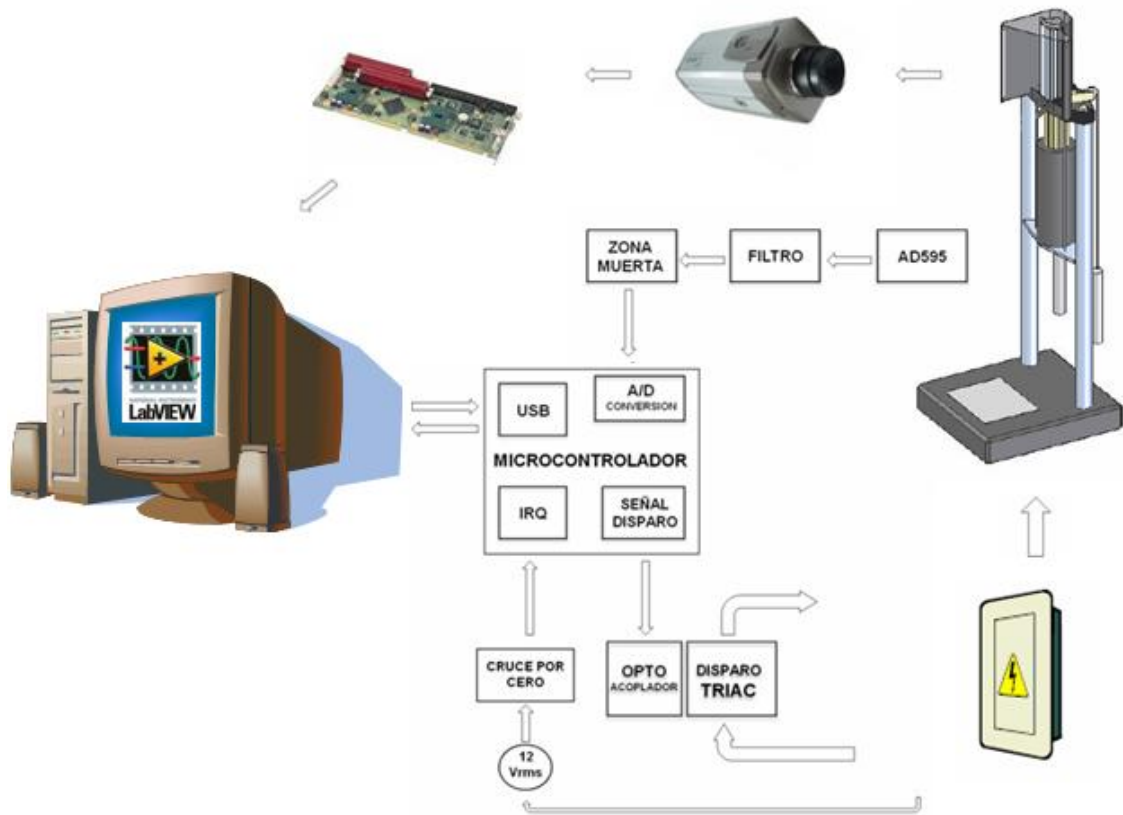


Figura 1. Esquema de los sistemas de adquisición de imágenes, registro de desplazamiento y control de temperatura.

## 2. DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU

### 2.1 DILATOMETRÍA<sup>3</sup>

Los dilatómetros permiten seguir las variaciones de la longitud de una muestra de carbón sometida a determinado gradiente térmico. Las medidas dilatométricas tienen como fin dar una apreciación de la aptitud a la coquización de un carbón o mezcla de carbones. En dichos ensayos, el carbón moldeado como un lápiz es calentado a una tasa de 3 °C/min desde 300 °C hasta 700 °C; el carbón se coloca en un recipiente cilíndrico cerrado por un pistón, cuyos desplazamientos son seguidos por medio de un dispositivo de medición.

Entre los equipos que se emplean para realizar estas mediciones se destacan: Sheffield, Hoffman, Chevenard-Jounier, Audibert-Arnu y Ruhr; sin embargo, los más difundidos en el mundo son los últimos.

El dilatómetro Audibert-Arnu es de origen francés, ha sido normalizado en el plan internacional con la norma ISO 349 (1975), y los datos obtenidos con este dilatómetro sirven para la clasificación internacional de los carbones. El resultado de la prueba es la curva dilatométrica, mostrada en la figura 2, de donde se pueden deducir los siguientes parámetros:

- a. Temperatura inicial de ablandamiento,  $T_a$ , °C.
- b. Temperatura de máxima contracción,  $T_c$ , °C.
- c. Temperatura de máxima dilatación,  $T_d$ , °C.
- d. Máxima contracción, “c”, %.
- e. Máxima dilatación, “d”, %.

---

<sup>3</sup> Para mayores detalles de esta prueba mirar SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR MEDIO DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES PARA EL DILATÓMETRO DE CARBÓN AUIDERT-ARNU.

La curva dilatométrica da una buena representación de las transformaciones que sufre el carbón en el estado plástico.

El primer tramo de la curva (desde  $T_a$  hasta  $T_c$ ) representa una contracción del carbón; ésta es determinada principalmente por el ablandamiento de las partículas de carbón, que bajo el efecto del peso del pistón, se deforman como una masa plástica. A la par con el ablandamiento, comienzan a desprenderse gases en forma de burbujas que tienden a hinchar la masa fundida; cuando este efecto prevalece sobre el primero, la contracción cesa y empieza la expansión. Ésta ocurre cuando las partículas de carbón están bien soldadas para ofrecer resistencia a la liberación de materia volátil; la expansión cesa apenas el fósil se empieza a resolidificar, por efecto de las reacciones pirolíticas que producen el semi-coque.

Fuente: Estudio de Yacimiento Carbonífero “La Quiracha” (Norte de Santander) para producción de Coque Metalúrgico.

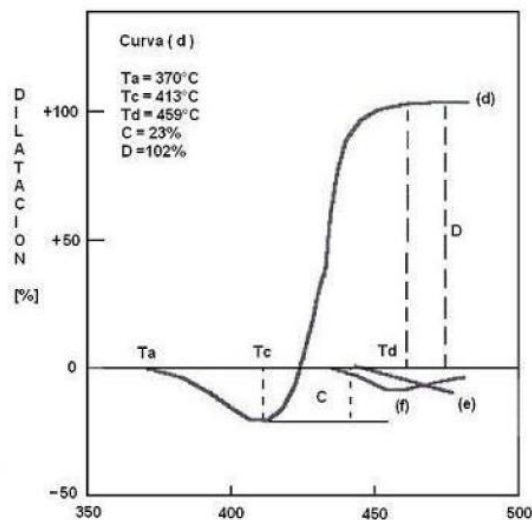


Figura 2. Curva Dilatométrica Típica.

Entonces, la expansión del carbón es el resultado de dos efectos: la plasticidad del carbón y la desgasificación. En el intervalo de temperatura en que la velocidad de

desgasificación y la plasticidad alcanzan los valores máximos se presenta la temperatura de máxima dilatación.

Fuente: *An Introduction to coal technology.*

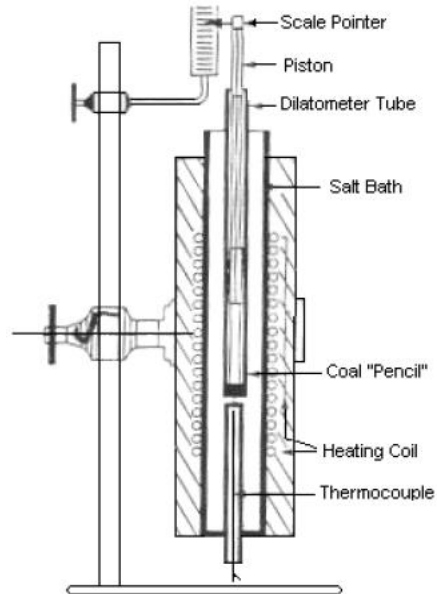


Figura 3. Esquema simplificado del Dilatómetro Audibert-Arnu.

Como fue mencionado anteriormente, para mediciones en el dilatómetro Audibert-Arnu, el carbón se le da forma de lápiz, se inserta en un tubo metálico, y sobre él opera un pistón que pone carga sobre el carbón. En la figura 3, se puede observar un esquema simplificado del dilatómetro.

## 2.2 REFERENCIAS DEL PROYECTO ANTERIOR

En el proyecto de grado “Sistema de medición de desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu”<sup>4</sup> se desarrolló un sistema de medición y control de la temperatura, además del registro

<sup>4</sup> BONILLA MURIEL Nohora Viviana, SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR MEDIO DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES PARA EL DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU.

de desplazamientos para el dilatómetro en cuestión, el cual se ubica en el laboratorio de Corrosión de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. A continuación se realiza una breve exposición de cada uno de los módulos que componen al proyecto.

**2.2.1 Sistema de adquisición de imágenes y registro de desplazamiento.** La prueba de dilatometría busca medir la contracción y dilatación de muestras de carbón sometidas a un gradiente térmico determinado. El sistema mecánico hace las veces de transmisor de estos movimientos a través de unos pistones que ejercen presión sobre cada una de las muestras, los cuales se desplazan sobre unas guías metálicas. Ya conocida la operación del equipo, se procede a fijar los requisitos del sistema de adquisición de imágenes. Entre ellos se destacan<sup>5</sup>:

|                            |          |
|----------------------------|----------|
| Distancia de trabajo:      | < 450 mm |
| Campo de vista horizontal: | 220 mm   |
| Resolución:                | ~ 1 mm   |
| Profundidad de campo:      | ~ 35 mm  |

A partir de estos, se realizó una selección de los componentes que se encargan de transformar la energía irradiada por los objetos en una imagen digital, que posteriormente será procesada. Estos elementos son: cámara CCD, lente, *frame grabber* y ambiente controlado de iluminación.

Una vez obtenida una imagen digital del transcurso de la prueba, se implementó un algoritmo que permitiera registrar el movimiento de las muestras de carbón. Se trabajó con la librería *Imaq Vision* de *Lab View* como software para el tratamiento

---

5 SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR MEDIO DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES PARA EL DILATÓMETRO DE CARBÓN AUIDERT-ARNU. Capítulo 3

de las imágenes. *Imaq Vision* añade herramientas multipropósito para el procesamiento de imágenes digitales, así como capacidades de visión artificial<sup>6</sup>. La estrategia escogida para la medición, consiste en ubicar los centros de masa de unas marcas rectangulares localizadas en un extremo de cada uno de los pistones. Como primera instancia, se extraen los planos rojo y verde de la imagen, se binariza y se realiza una operación XOR de manera que se elimine el aporte de las guías metálicas (sobre las que se mueve el pistón), y se obtenga una imagen con solo las marcas. Como segunda instancia, se realiza un filtrado que inhibe el ruido presente en la imagen y posteriormente se calcula el centro de masa de cada una de las marcas. Finalmente, se debe asociar la ubicación de este punto (en píxeles) con la información obtenida en el proceso de calibración, que permite realizar una conversión a unidades del mundo real. El siguiente diagrama de flujo representa de forma clara el programa desarrollado:

Fuente: Sistema de medición de desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu.

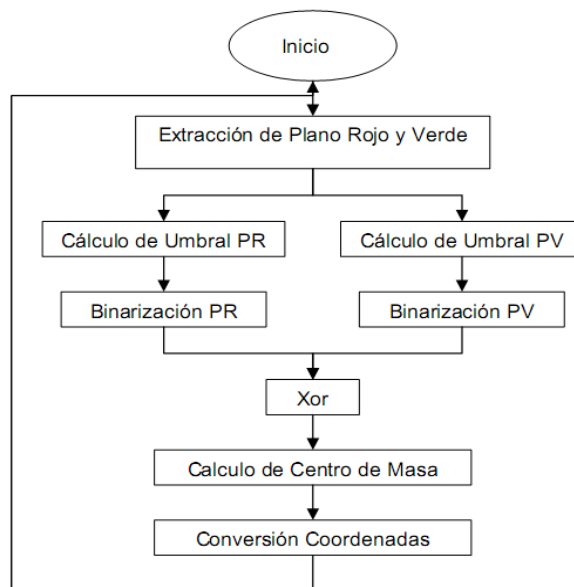


Figura 4. Diagrama de flujo proyecto predecesor.

<sup>6</sup> Imaq Vision 6.0 for Lab View Release Notes

Este algoritmo resulta bastante sencillo y práctico. No obstante, presenta 2 grandes falencias:

- Una fuerte dependencia hacia el sistema de iluminación controlado. Indudablemente un ambiente iluminado apropiadamente puede llegar a aumentar el contraste y la resolución de la imagen, de forma tal que el comportamiento global del sistema se incrementa. En ciertos casos la calidad de una imagen puede acrecentarse realizando mejoras al sistema de iluminación, en lugar de realizar inversiones adicionales, ya sea en cámaras, lentes, hardware o software. En este proyecto en particular, el umbral utilizado para binarizar los planos extraídos a las imágenes resulta ser una constante en el proceso (a raíz de que no existe evidencia física que indique lo contrario). Aquí se logran exhibir ciertas limitaciones del programa. Es decir, al modificar los dispositivos con los que se ilumina la imagen, el resultado de la operación de umbralización cambia dramáticamente, de manera que es posible observar otros detalles además de las marcas, que en este caso, resultan irrelevantes y alteran el resultado de la medición del desplazamiento de las mismas. Así, la probabilidad de que las muestras obtenidas sean equivocadas aumenta con las variaciones de la luz que incide durante el experimento.
- Alguna prevención para evitar la toma de medidas erróneas. Esto debido a fallas presentes durante el proceso de calibración del sistema, que conlleva a una conversión de unidades equívocas o poco precisas. En ningún momento se realizó alguna prueba que permitiera determinar y evaluar la resolución del sistema.

El presente proyecto no pretende realizar críticas a la solución planteada, ya que, como se mencionó anteriormente, el algoritmo es sencillo, y bajo las condiciones idóneas, debería funcionar de una manera acertada. Sin embargo, tener en cuenta estos hechos han ayudado a que el nuevo programa desarrollado para realizar el

registro de desplazamiento sea un tanto más inmune a estos factores, con lo cual, el sistema en general se hace más robusto.

### **2.2.2 Control de temperatura**

La adquisición del valor de la temperatura fue efectuada a través de una termocupla tipo K, realizando una amplificación y la corrección del efecto frío de la señal con el circuito integrado AD595, entregando así una medición correcta. Después de adecuar la señal para su lectura, se utilizó un conversor analógico digital de 14 bits, el cual hacía la entrega del dato de conversión por medio de una interfaz serial a un microcontrolador GP32 de la familia HC08 de *freescale*, mismo encargado de la entrega de datos de temperatura al computador por medio de la interfaz serial RS-232 bidireccional, requiriendo electrónica para la conversión de tensiones.

El control era realizado por PC con la librería *PID Control Toolset* de *Lab View*, la cual proporciona un nivel de tensión que es transmitido, por medio del microcontrolador y un potenciómetro digital, a una etapa de potencia, determinando el ángulo de disparo de un control AC de línea monofásico. El disparo al triac fue realizado por medio del circuito integrado TCA 785.

Una de las principales desventajas de esta tarjeta de adquisición de datos es el protocolo de comunicación RS-232, que se maneja por medio de una conexión al computador por cable tipo DB9, debido a que dicho protocolo ha perdido popularidad frente a otros (como el USB) en los ordenadores actuales, y se requería de una actualización a un tipo de conexión de mayor disponibilidad.

## **2.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

A continuación se describe el estado en el que se encontró el dilatómetro Audibert-Arnu:

### **2.3.1 Horno Eléctrico**

El horno se calienta por medio de una resistencia, que convierte energía eléctrica en térmica. Se alimenta a través de una línea bifásica de 220 Vrms. Una primera caracterización del equipo, que se realizó conectando directamente los 220 Vrms, arrojó como resultado una tasa de calentamiento de 10 °C/min aproximadamente (ver figura en capítulo de control de temperatura).

### **2.3.2 Instrumentos de regulación y control de la temperatura**

Se evidencia el mal estado de las tarjetas de circuito impreso que realizaban las funciones de supervisión y control del gradiente térmico requerido para la prueba. Además, gran parte de los dispositivos electrónicos utilizados estaban deteriorados o quemados. También se encontraron algunas dificultades con el uso de la termocupla tipo K, debido a que esta no tenía aislamiento del metal, y al contacto metálico con el horno, aparecía ruido de 60 Hz, proveniente de la red de distribución, el cual no permitía realizar una medición adecuada de la tensión generada por la termopar, que es leída directamente del instrumento a través del circuito integrado AD595. En retrospectiva, no se pudo establecer si en algún momento el sistema de control implementado operaba con la tasa de calentamiento demandada.

### 2.3.3 Sistema de adquisición de imágenes y registro de desplazamiento

Los elementos que se encargan de producir una señal eléctrica proporcional a la intensidad luminosa y convertir dicha señal en una imagen digital, es decir, la cámara CCD, el lente y el *frame grabber* se encontraron en un estado aceptable. Se efectuaron diferentes pruebas, capturando imágenes en un computador, con distintos formatos y resoluciones, que evidenciaron un correcto funcionamiento. Sin embargo, el software que permite almacenar, manipular, procesar y analizar las imágenes obtenidas, para finalmente realizar la medición del movimiento de las muestras de carbón, no se encuentra presente en ninguno de los equipos de cómputo ubicados en el laboratorio. Debido a esto, no fue posible conocer las características del programa, como precisión, tiempo de ejecución, velocidad de respuesta, entre otras, de forma tal que se pudieran comparar con el algoritmo desarrollado en el presente trabajo.

Los testimonios de algunos de los encargados del laboratorio de Corrosión<sup>7</sup> indican que el quipo funcionó de la manera dictada por los estándares<sup>8</sup>. Sin embargo, no hay constancia de que el sistema implementado para calcular desplazamientos y controlar la temperatura haya operado correctamente en algún momento, ya que no se encontró ninguna curva de dilatometría, ya sea impresa o en formato digital, elaborada por el equipo.

---

<sup>7</sup> Ambrosio Carrillo Carrillo, Encargado del laboratorio.

<sup>8</sup> ISO 349-75.

### 3. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales realizó una inversión de dinero, con el fin de automatizar el funcionamiento del dilatómetro Audibert-Arnu. A pesar de ello, el sistema implementado estaba fuera de servicio, debido a inconvenientes ya expuestos en el capítulo 2. Es por esto que el presente proyecto ha hallado su justificación.

La prueba de dilatometría es algo extensa, ya que, como fue indicado anteriormente, mide el desplazamiento de muestras de carbón en función de la temperatura, que varía a una tasa de 3°C/min desde 300°C hasta 700°C. El rango de esta prueba, según estudios realizados<sup>9</sup>, es de 0 - 180 mm. Dicha posición resulta variar lentamente<sup>10</sup>. Debido a esto, no se hace necesario calcular de manera continua la posición de las muestras. Se decidió realizar las mediciones correspondientes a una rata de 1 imagen cada 5 segundos.

Con base en lo anterior, es posible diseñar una secuencia para efectuar las mediciones, que básicamente se divide en 3 aspectos fundamentales: a) adquisición de la imagen para ser procesada, y b) cálculo y registro del desplazamiento de las muestras.

#### 3.1 ADQUISICIÓN

Al llevarse a cabo una revisión minuciosa de los elementos que componen el sistema de adquisición de imágenes, y de corroborar su adecuado desempeño, efectuando pruebas en las cuales se capturaron diferentes imágenes con distintos

---

9 CONTRERAS SANCHEZ Omar, VILLAMIZAR GARCÍA Libardo, ESTUDIO DEL YACIMIENTO CARBONÍFERO "LA QUIRACHA" (NORTE DE SANTANDER) PARA PRODUCCIÓN DE COQUE METALÚRGICO.

10 Mirar curvas presentadas como resultados más adelante y referencia 6.

formatos y resoluciones, se decidió conservarlos en su totalidad, a excepción del ambiente controlado de iluminación debido a inconvenientes en su operación. Además, se busca hacer al sistema tan robusto como sea posible ante variaciones aceptables en las condiciones de iluminación. En conclusión, la cámara CCD, el lente, el *frame grabber* y el software *Lab View* continuarían siendo parte del sistema global.

Para la selección de los elementos que hacen parte de este sistema (realizada durante el desarrollo del proyecto anterior<sup>11</sup>), se tuvieron en cuenta los requisitos del sistema, mencionados en el ítem 2.2.1. Cabe recordar, que el elemento limitante, en el aspecto de desempeño (específicamente resolución), era la cámara CCD, ya que fue el primer instrumento con el que se contaba, y no valía la pena escoger elementos con características superiores, ya que estas se hubieran visto opacadas y se incurriría en un desperdicio o malgaste de sus capacidades.

En cuanto al software de procesamiento de imágenes, se decidió continuar con el uso de *Lab View* debido a que la tarjeta de adquisición de datos cuenta con la extensión *IC Imaging Control*, la cual consiste en una serie de *Vis* y *DLLs*, que de manera sencilla permiten elegir el dispositivo que captura las imágenes, el formato de video, el tipo de imagen, entre otras propiedades. Además, permite grabar imágenes que después serán procesadas.

### **3.2 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES**

Una vez obtenida una imagen correspondiente a cierto instante de tiempo durante la prueba, se procede a implementar un algoritmo que calcule los desplazamientos de las diferentes ejemplares de carbón.

---

<sup>11</sup> SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR MEDIO DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES PARA EL DILATÓMETRO DE CARBÓN AUIDERT-ARNU. Capítulo 3

Ubicar la posición del centro de masa de unas marcas rectangulares, a partir de la extracción de diferentes planos de colores, y aislando dichas marcas de otras formas que para la aplicación resultan irrelevantes (algoritmo propuesto en el proyecto anterior<sup>12</sup>), resultó ser una solución sencilla para diferenciar la posición de cada una de las muestras de carbón. Sin embargo, la estrecha relación entre la iluminación del sistema y la forma final obtenida de las marcas al ser procesadas, hace que esta solución solo pueda ser implementada bajo unas condiciones idóneas.

*Imaq Vision Builder* es un paquete especial de *Lab View*, que permite construir prototipos para aplicaciones de visión, además de examinar y aprender cómo funcionan varios procesos de visión artificial y procesamiento digital de imágenes<sup>13</sup>. A partir de esta interfaz, se puede observar de manera rápida el resultado de aplicar una operación para transformar una imagen, ya sean del tipo de realce de características, restauración, procesamiento de imágenes en color, morfología, segmentación, reconocimiento de objetos, entre otras. A continuación se presentan una serie de figuras, utilizando *Imaq Vision Builder*, en las cuales se aprecia el efecto de modificar las condiciones de iluminación, dejando constante el umbral para la operación de binarización, de manera que se ilustren algunos de los inconvenientes de la primera solución del problema de medición:

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Imaq Vision Builder*.

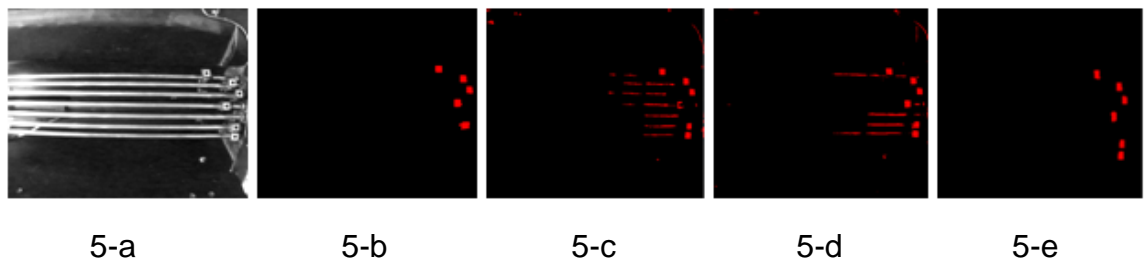


Figura 5. Efecto de variar las condiciones de iluminación.

<sup>12</sup> SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR MEDIO DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES PARA EL DILATÓMETRO DE CARBÓN AUIDERT-ARNU. Capítulo 4

<sup>13</sup> Imaq Vision Builder Release Notes

Como puede verse, las salidas obtenidas pueden llegar a alejarse abruptamente de los resultados deseados, con lo cual, el cálculo del centro de masa adquiere un error considerable, afectando la medición final. Una manera de compensar estos defectos es alterar el algoritmo para la obtención de las coordenadas del centroide, adicionando una serie de operaciones de filtrado, morfología y segmentación, que conlleven a una solución satisfactoria. Sin embargo, hay dos limitantes: a) si se cambian nuevamente las condiciones de iluminación, se puede llegar a presentar el mismo efecto descrito anteriormente, con lo cual, habría que sustituir las operaciones efectuadas por otras y b) aumentar el número de operaciones conlleva a un incremento en el tiempo de procesamiento. Es aquí donde se define un equilibrio entre precisión del algoritmo y tiempo de ejecución. Dependiendo de la aplicación, el uno puede primar sobre el otro.

Buscando implementar una solución más robusta, se decide entonces buscar otra alternativa para identificar las marcas, y realizar el cálculo de los desplazamientos de las muestras de carbón. *Imaq Vision* ofrece una herramienta llamada *Pattern Matching*, la cual brinda una serie de características que en el presente problema resultan atractivas. Seguidamente, se da una explicación detallada sobre este bloque funcional:

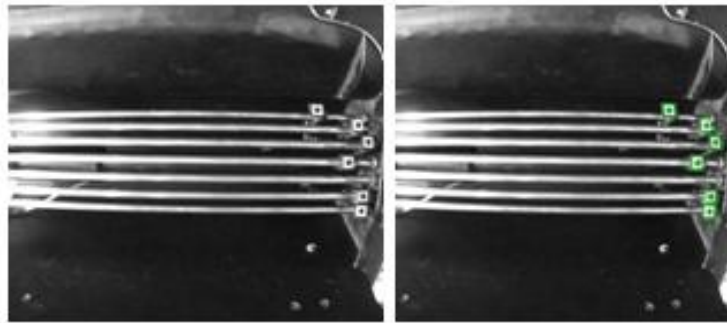
*Pattern Matching* localiza regiones en una imagen en escala de grises que coinciden con un *template* o patrón predeterminado. Esta función ubica dichas zonas a pesar de efectos adversos tales como una pobre iluminación, manchas, ruido, desplazamiento o rotación del *template*<sup>14</sup>. El usuario crea un patrón que representa un objeto de interés que se buscará en una porción o en la totalidad de la imagen. Luego, el algoritmo reconoce este modelo en cada una de las imágenes que se desean procesar, calculando una serie de parámetros, entre los cuales se destacan *score*, posición del centro de masa, ángulo de rotación, escala y fronteras del patrón. De estos, el que retoma mayor importancia es *score*, el cual

---

<sup>14</sup> Imaq Vision Concepts Manual. Capítulo 12.

es un número entre 0 y 1000, que describe qué tan semejante es la región de la imagen localizada con respecto a la referencia almacenada (*template*). En seguida, se ilustra el resultado que arroja *Pattern Matching* de una imagen del proceso:

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Imaq Vision Builder*.



6-a

6-b

Figura 6. Resultado de utilizar *Pattern Matching*

En la figura, se han ubicado las 6 marcas correspondientes a las muestras de carbón. Dichas marcas serán una constante durante toda la prueba de dilatometría. Sin embargo, hay algunos aspectos a tratar:

- En la elección del *template*, debe existir un contraste suficiente entre éste y el resto de la imagen para que la búsqueda sea eficiente. Es decir, se localicen las zonas de la imagen a las que realmente se asemeja. Para esta aplicación específica, el tamaño mínimo del patrón debe ser de 24x22 píxeles para que el software reconozca las marcas satisfactoriamente.
- *Score*, como se señaló antes, describe qué tan similares son el *template* y cierta región de la imagen. En el presente problema, es necesario tener en consideración el hecho de que no todas las etiquetas (ejemplares de carbón) se encuentren en el mismo plano, por lo cual, van a existir algunas diferencias entre

ellas. Por ejemplo, sobre la superficie de algunas marcas incide más luz que sobre otras, y también, existe la posibilidad de que algunas se vean más grandes que las demás. Este efecto negativo se logra corregir ajustando el *score* mientras se programa el bloque *Pattern Matching*. A raíz de una serie de experimentos de laboratorio, ajustando diferentes niveles de intensidad luminosa, se estableció que el valor mínimo del parámetro *score* debe ser de 600 para que se ubiquen sin ningún tipo de contratiempo la totalidad de las marcas. Para un valor inferior, cabe la eventualidad de ubicar zonas que realmente no corresponden al *template*. Si el valor es superior, se puede dar el caso de que en alguna de las imágenes que llegan del transcurso de la prueba de dilatometría, alguna de las etiquetas no sea localizada, y el resultado final se verá afectado.

- No es factible conocer de antemano en qué orden se localizarán las marcas. Es decir, aludiendo a la figura 6-b, las zonas que se asemejan al *template* pueden ser ubicadas en el orden, mirando la imagen desde arriba hacia abajo, 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Sin embargo, al procesar una imagen correspondiente a un lapso diferente, las regiones de interés pueden ser situadas, tomando el mismo marco de referencia, 1, 3, 5, 2, 6, y 4. Con esto, se requiere desarrollar una lógica que permita discernir qué marca corresponde a cada una de los ejemplares de carbón de una manera óptima.
- *Imaq Vision Builder* permite evaluar cuánto tiempo demora un algoritmo en ejecutarse. Para este caso específico, se emplean 37 ms aproximadamente para encontrar el conjunto de las marcas (esto sin incluir el tiempo que se demora convirtiendo las coordenadas en píxeles en coordenadas reales). En alguna otra aplicación donde sea preciso capturar y procesar una serie de imágenes por segundo, este algoritmo resultaría ineficiente.

Una vez discutidas las consideraciones previas, se continúa con la exposición del algoritmo desarrollado. El *template* que se elige para el proceso, tiene una

resolución mínima de 24x22 píxeles, y presenta la forma de un cuadrado de color negro inscrito en uno plateado, de forma tal que existe un alto contraste entre las 2 figuras geométricas (ver figura 6-a). Este elemento, que es almacenado en memoria, será una constante durante todo el desarrollo de la prueba de dilatometría. Para aprender el patrón se utiliza el *VI Imaq Learn Template*.

Ya definido el *template*, se busca una estrategia que permita diferenciar qué marca corresponde a cada una de las muestras, debido a que, como se mencionó anteriormente, el bloque *Pattern Matching* localiza las muestras, pero no se tiene la certeza sobre el orden en que son encontradas. Realizando una revisión acerca de cómo es representada una imagen el *Lab View*, se encuentra una manera práctica para lograr distinguirlas acertadamente.

Por convención, la referencia espacial de un píxel con coordenadas (0,0) es localizada en la parte superior, esquina izquierda de la imagen<sup>15</sup>. En la figura se aprecia que el valor de x se incrementa moviéndose de izquierda a derecha, y los valores de y incrementan de arriba hacia abajo.

Fuente: *Imaq Vision Concepts Manual*. Capítulo 1.

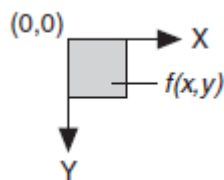


Figura 7. Representación espacial del píxel (0,0).

Tomando como referencias las figuras 5-a y 6, el eje x representa el desplazamiento de las muestras, mientras que el eje y expresa la diferencia entre cada marca. Para ser más específicos, la ubicación sobre el eje y indica qué marca corresponde a cada muestra, debido a que en el transcurso de la prueba,

---

<sup>15</sup> Imaq Vision Concepts Manual. Capítulo 1.

este valor tendrá una variación máxima de  $\pm 1$  píxel, siempre y cuando la cámara se ubique de manera perpendicular a las varillas metálicas sobre las cuales se trasladan los pistones, y permanezca en una posición fija. Así, aludiendo a la figura 4-b, el primer patrón encontrado tendrá una posición  $x$  muy diferente a la de los demás.

Uno de los parámetros que calcula *Pattern Matching* es la localización del centro de masa de cada una de las zonas similares al *template*. Estas coordenadas se alojan dentro de un arreglo de datos diferentes o *cluster*, en el que también se encuentran *score*, ángulo de rotación, escala y fronteras del patrón. Cada elemento de este arreglo contiene los datos anteriormente descritos para cada una de las regiones que coinciden con dicho patrón. Basta con organizar este arreglo, en orden ascendente o descendente con respecto a  $x$ , para tener la certeza de qué marca hace referencia a qué muestra de carbón. El valor de  $y$  dará el valor del desplazamiento de la muestra.

Cabe señalar que la primera imagen que se tome de la prueba de dilatometría será la referencia para todas las demás imágenes que se capturen a través del sistema de adquisición. Es decir, las coordenadas  $y$ , que aluden al cambio en la posición de las muestras, deberán ser ajustadas a partir de las coordenadas  $y$  iniciales. Esta posición original, resulta ser una constante para todo el transcurso de la prueba.

Finalmente, se debe asociar la ubicación de cada centro de masa (en píxeles) con la información obtenida en el proceso de calibración, que permite realizar una conversión a unidades del mundo real. El proceso de calibración consta básicamente de 2 partes:

- Utilizar el bloque funcional *Imaq Learn Calibration Template*. Este VI permite asociar una información de calibración a partir de un patrón. Este patrón puede ser

una grilla de puntos (ilustrada en la figura 8), o una serie de coordenadas del mundo real que son conocidas de antemano. En este caso en particular, se utiliza una grilla de puntos, a la cual, se le especifica el  $dx$ ,  $dy$  y las unidades de medida. El algoritmo de calibración utiliza la imagen de la cuadrícula y el espacio entre los puntos para generar una lista de píxeles para el mapa del mundo real requerida en el proceso. Se seleccionan los parámetros *nonlinear* (para corregir errores de distorsión), *scale to preserve area* (de manera que la imagen corregida tenga las mismas características que la imagen de entrada) y *full image* (para que la imagen completa sea corregida).

- Usar el VI *Imaq Set Calibration Info* para asignar una información de calibración, obtenida de *Imaq Learn Calibration Template* a partir de una grilla de puntos, a una imagen correspondiente al transcurso de la prueba de dilatometría, que no está calibrada. El único requisito es que las 2 imágenes sean del mismo tamaño.

Fuente. Autores del proyecto.

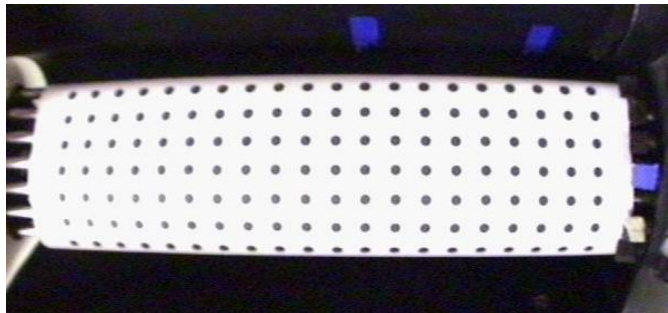


Figura 8. Cuadrícula de puntos utilizada en la calibración de imágenes.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo implementado en *Lab View* para el cálculo de los desplazamientos de las muestras de carbón:

Fuente: Autores del proyecto.

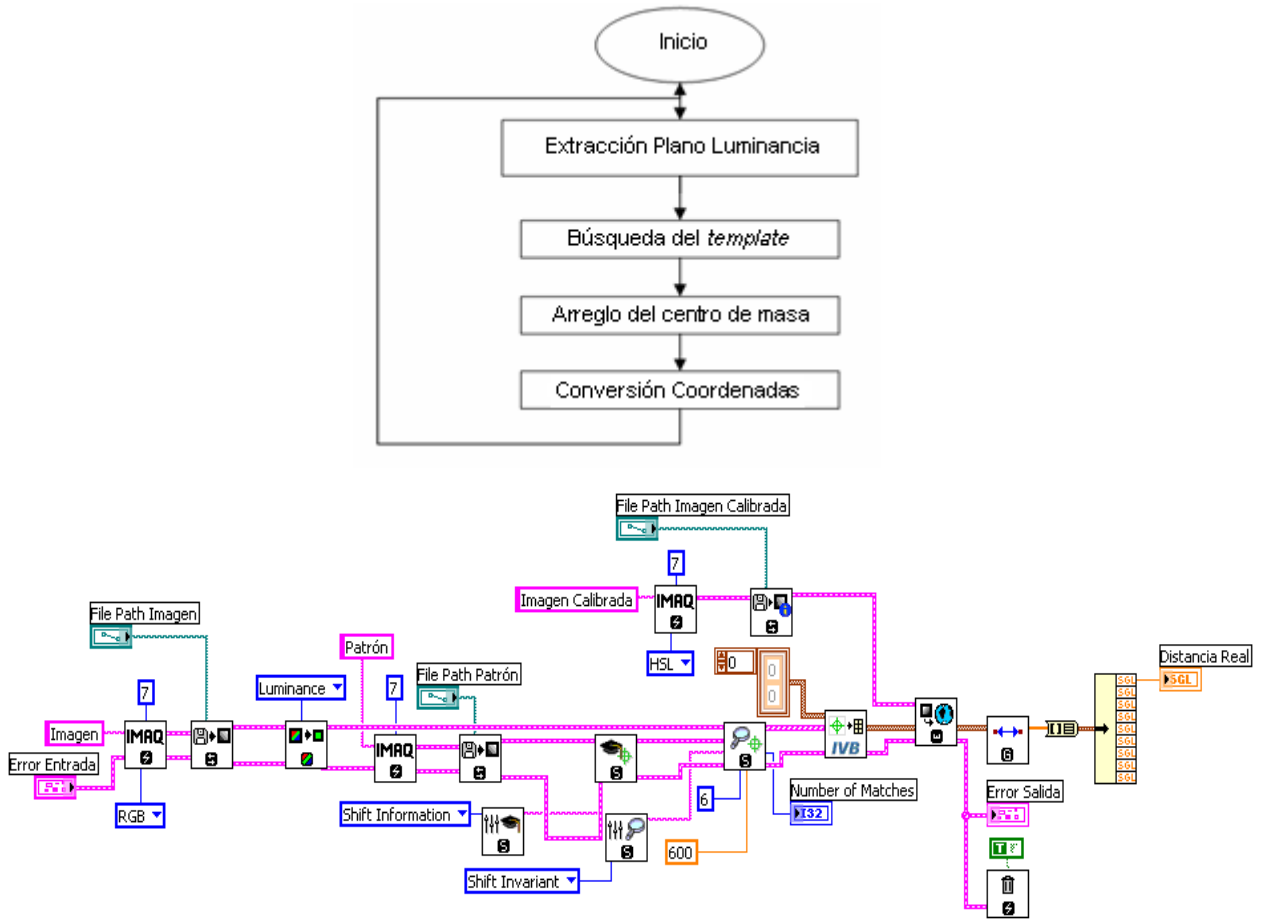


Figura 9. Diagrama de flujo implementado y código en Lab View.

#### 4. SISTEMA DE CONTROL DE GRADIENTE DE TEMPERATURA DEL HORNO

La prueba dilatométrica tiene entre sus requerimientos, que las muestras de carbón sean expuestas a un perfil de aumento de temperatura de 3 °C por minuto. Para lograr este objetivo, y debido a que los datos de temperatura deben almacenarse, ya que la deformación sufrida por las muestras de carbón es función de estos, se propuso realizar un control digital, utilizando como controlador un computador, apoyado del programa el programa *Lab View*, de *National Instruments*, el cual cuenta con herramientas para la adquisición de datos desde diferentes fuentes, y bloques especializados para la ejecución del control de un proceso.

La figura 10 muestra el diagrama de bloques del sistema. La parte del dilatómetro que hace las veces de planta del proceso de control de temperatura es su horno, teniendo como variable de control la temperatura a la que están expuestas las muestras de carbón a las que se les realiza la prueba dilatométrica. El sensor seleccionado es una termocupla tipo K ya dispuesta para el equipo, cuya señal ingresa a un circuito encargado de amplificar, filtrar, seleccionar, y convertir esta señal analógica en una digital. A continuación, se envía esa medición a un computador que además de registrar los datos, se encarga de realizar el control. Por último, se transmite la señal del controlador a un control AC de línea, que dispara un triac a través de un microcontrolador, variando así el voltaje RMS al que está expuesta la resistencia calefactora del horno, la cual es el actuador del sistema.

Fuente: Autores del proyecto.

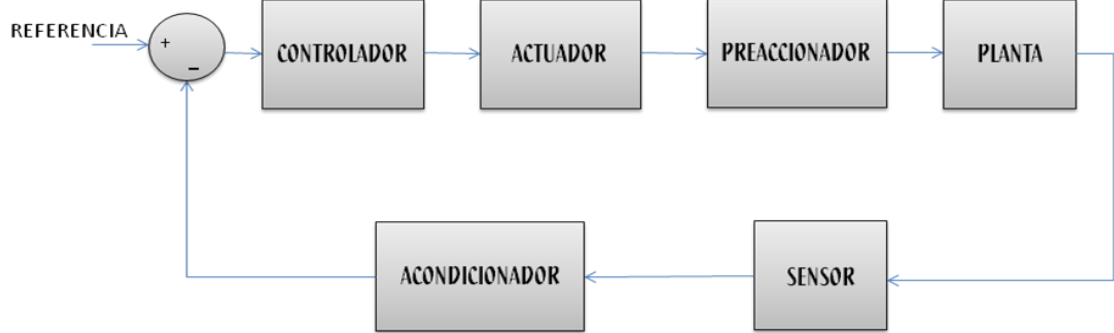


Figura 10. Representación en diagrama de bloques del sistema.

En lo que sigue, se describe más claramente cada uno de los componentes que conforman sistema.

#### 4.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA

**4.1.1 Planta.** El horno con que se cuenta para la realización de la prueba dilatométrica es calentado a través de una resistencia calefactora de  $34.6 \Omega$  (Actuador), que se alimenta con una fuente bifásica de 220 Vrms, la cual consume una corriente aproximada de 6,36 Arms.

La planta que se desea controlar está constituida por un sistema térmico, y por tanto tiene una dinámica lenta. Una desventaja de esta dinámica lenta es el tiempo empleado para la caracterización del sistema con el fin de realizar el diseño del controlador.

Se encontró el perfil de temperatura del horno, aplicando la tensión de 220 Vrms, y tomando un dato de temperatura cada minuto, desde la temperatura ambiente, hasta una temperatura de  $708 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para la toma de datos se utilizó una termocupla tipo K, en conjunto con un termómetro para medición de este tipo de instrumentación, registrando los valores por lectura en un panel digital. Los

resultados se aprecian en la gráfica 11. En anexo 2 se encuentra el gradiente de temperatura obtenido minuto a minuto en la prueba, datos que permiten observar que inicia con un gradiente incremental hasta llegar a los 100 °C, en donde el gradiente se estabiliza a cerca de 10°C por minuto, manteniéndose así hasta los 470 °C. A partir de esta temperatura el gradiente empieza a disminuir gradualmente, teniendo a los 700 °C un valor de unos 5 °C por minuto.

Fuente: Autores del proyecto.

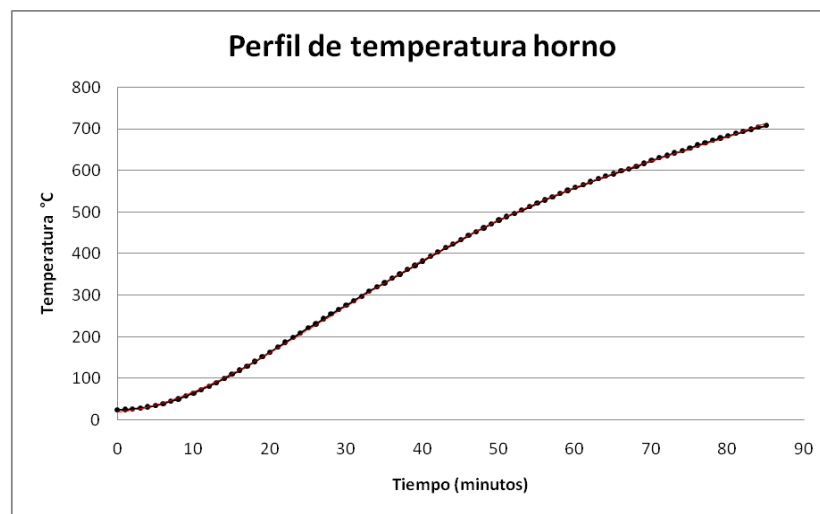


Figura 11. Perfil de temperatura del horno expuesto a 220 Vrms.

- **Enfriamiento del horno**

Con el horno a una temperatura cercana a los 420 °C, se realizó un muestreo de temperatura cada 5 segundos durante 10 minutos para observar su comportamiento en enfriamiento, mostrado en la gráfica 12. Al tomar los datos recolectados y analizarlos, se encuentra que se ajustan muy bien a una tendencia lineal, y su temperatura se reduce a una tasa aproximada de 5,94 °C por minuto. Esto da una estimación del tiempo que se requiere para que el horno vuelva a la temperatura ambiente después de haber finalizado una prueba dilatométrica, en la

que llega hasta los 600 °C; este tiempo sería de 1 hora y 37 minutos aproximadamente.

Fuente: Autores del proyecto.

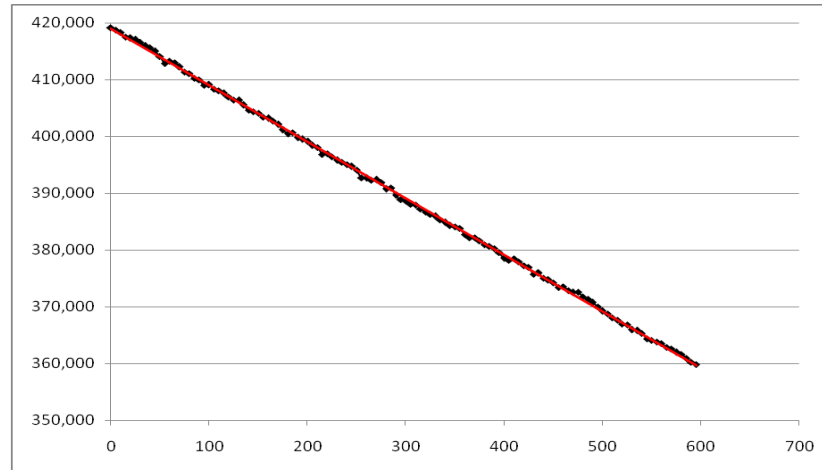


Figura 12. Temperatura del horno al enfriamiento.

**4.1.2 Sensor.** El elemento encargado del sensado de la variable de control es una termocupla tipo K acondicionada para ser utilizada en el dilatómetro en un proyecto anterior. Esta tiene 30 cm de revestimiento de INCONEL 600 (soporta hasta 1100 °C) y un cable de extensión de 1.8 m en fibra de vidrio con malla (soporta hasta 550 °C). Se analizaron otras posibilidades para remplazo del sensor buscando una opción que presentara mayor linealidad. Aunque una RTD tiene un comportamiento más lineal que la termocupla, se optó por esta última por estar elaborada para el dilatómetro, y porque además también se contaba con un circuito integrado que serviría como acondicionador de la señal. Otro motivo para mantener la termocupla es que en el rango de trabajo requerido (de temperatura ambiente a 600 °C), su comportamiento es bastante lineal, y es muy sencillo hacer ajustes para mejorar esa linealidad.

El único inconveniente que se presentó con la termocupla, es que ésta no estaba adecuadamente aislada, por lo que utilizaban un amplificador aislador para separar la parte digital del contacto con el horno. Sin embargo, cualquier contacto metálico de la termocupla con el horno genera excesivo ruido, y al adicionar más circuitería se tiene el riesgo de aumentar el ruido en el sistema, reduciendo así su precisión. Por esto, se decidió aislar físicamente la termocupla, una solución más sencilla y que reduce la complejidad de la circuitería necesaria para la captura de los datos de temperatura.

**4.1.3 Acondicionador.** Debido a que el sistema será controlado por un subprograma de *Lab View*, se requiere que el acondicionador se encargue de tomar la tensión generada por la termocupla, y entregar este dato al computador para su respectivo procesamiento. El acondicionador se divide en varios bloques, que se muestran en la figura 13, y se describen en lo que sigue.

Fuente: Autores del proyecto.

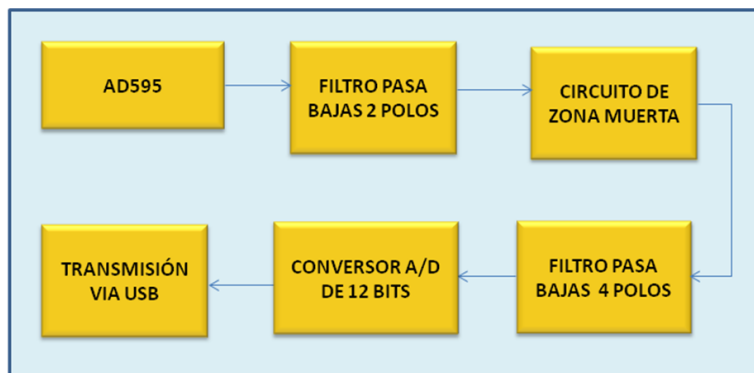


Figura 13. Diagrama de bloques de acondicionamiento de la señal.

**4.1.3.1 AD595.** Es un completo amplificador de instrumentación y compensador de unión fría para termocuplas en un chip monolítico. Combina un punto de referencia frío con un amplificador prefabricado para producir una salida de alto

nivel (10 mV/°C) directamente de una señal de termocupla. Puede ser usado para amplificar su voltaje de compensación directamente, convirtiéndolo de este modo en transductor *Celsius* con un voltaje de baja impedancia de salida, de 10 mV por grado centígrado. El AD595 incluye una alarma de falla de termocupla que indica si alguno de los cables de la termocupla se abre. La salida de la alarma tiene un formato flexible que incluye capacidad para manejar lógica TTL.

El AD595 es precalibrado para acoplarse a las características de las entradas en las termocuplas tipo K (cromo-alumel). Tiene disponibles pines para transductores de temperatura y resistores de control de ganancia, con el fin de recalibrar el circuito para otros tipos de termocuplas. Estos pines también permiten mayor precisión en la calibración para aplicaciones con termocuplas. El AD595 está disponible las versiones C y A, que tienen precisiones de calibración de  $\pm 1$  °C y  $\pm 3$  °C, respectivamente<sup>16</sup>.

Fuente: *National Instrument, datasheet AD595.*

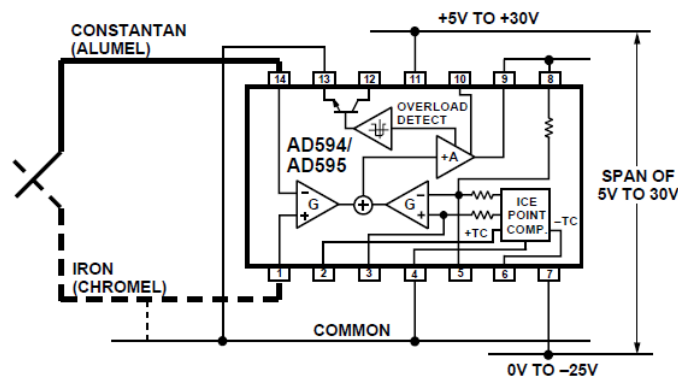


Figura 14. Diagrama de bloques y conexión del circuito integrado AD595.

Para el dilatómetro se dispone de la versión A del AD595, la cual presenta un costo significativamente menor. Aunque El AD595 puede ser alimentado con una

<sup>16</sup> ANALOG DEVICES. AD595/AD595 datasheet. Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

fuentes de tensión positiva, éste fue alimentado con una fuente dual de +/-10V, pues el fabricante recomienda esta forma de alimentación para obtener una mayor precisión en su salida.

Al observar la característica de tensión versus la temperatura del AD595, se encuentra que su salida de 10 mV/°C, es muy cercana a la temperatura real a bajas temperaturas, pero desde los 300 °C en adelante el valor de temperatura correspondiente a la variación de tensión, se va alejando del valor real a medida que recibe mayor temperatura. Esto fue observado en pruebas de laboratorio, y coincide con los datos de la salida de voltaje del AD595 versus la temperatura de la termocupla, entregada por el fabricante.

Para compensar el dato entregado por el AD595, y tener un valor más real de temperatura, se trazaron 2 rectas, una del comportamiento del AD595 (según variación de 10 mV/°C), y otra de la temperatura real para 29 valores de temperaturas, en el rango entre 200 y 760 °C, cuyos datos se observan en el anexo 2. Estas rectas se pueden apreciar en la gráfica 16, y se representan con las funciones:

$$\text{Temperatura AD595: } y = 20,862x + 177,54$$

$$\text{Temperatura real: } y = 20x + 180$$

Fuente: Autores del proyecto.

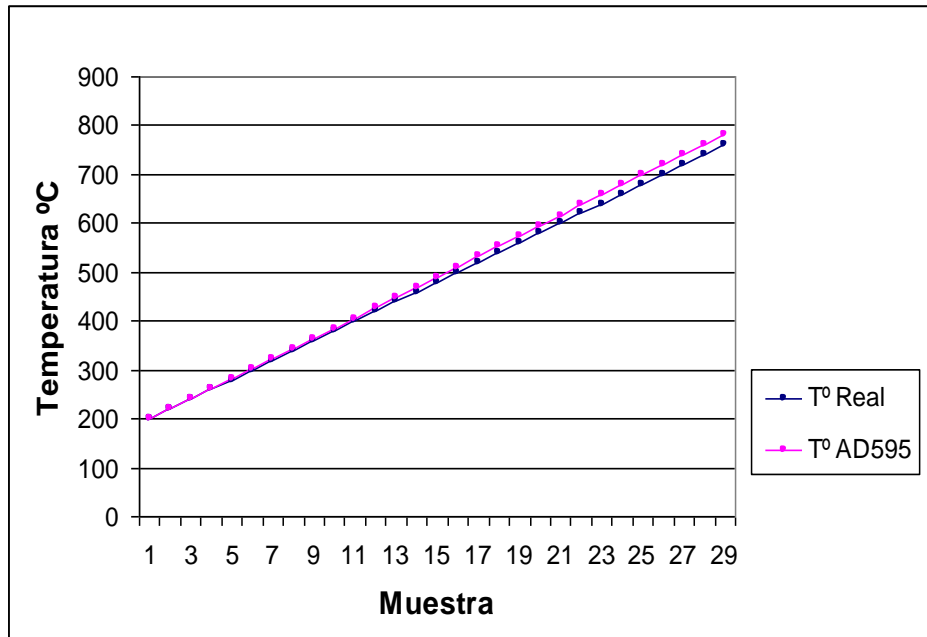


Figura 15. Comparación temperatura real vs temperatura del AD595.

De esta manera, se puede encontrar una sencilla relación que permita, a partir de un valor de tensión entregado por el AD595, obtener un crecimiento de 10 mV/°C, que se ajuste más al valor de temperatura real. La relación obtenida es:

$$T_R = 9.8447 + 0.9587 * T_{AD595}$$

Donde  $T_R$  es la temperatura real, y  $T_{AD595}$ , es el valor entregado por el amplificador. Esta fórmula se ajusta mejor a los valores de temperatura entre los 300 y 700 °C, el cual es el rango en que debe controlarse el perfil de temperatura del horno para la prueba dilatométrica. Esta compensación se realiza por software, en *Lab View*, para facilitar su implementación.

**4.1.3.2 Filtro pasa bajas.** A la salida del AD595 se observa una gran variedad de ruido, principalmente de la frecuencia de 60 Hz de la red, por lo que es necesaria la implementación de un filtrado que elimine esta componente, y entregue una

tensión DC limpia a la conversión analógica a digital, pues esta parte es indispensable para garantizar una adecuada precisión del dato de temperatura leído. En la figura 16 se observa la topología de circuito seleccionada para el filtro. Se trata de un filtro Bessel pasa bajas de 2 polos, con frecuencia de corte, 2 Hz, implementado con amplificadores operacionales TL084, los cuales presentan aceptables características para ser utilizados en filtros activos.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Orcad*.

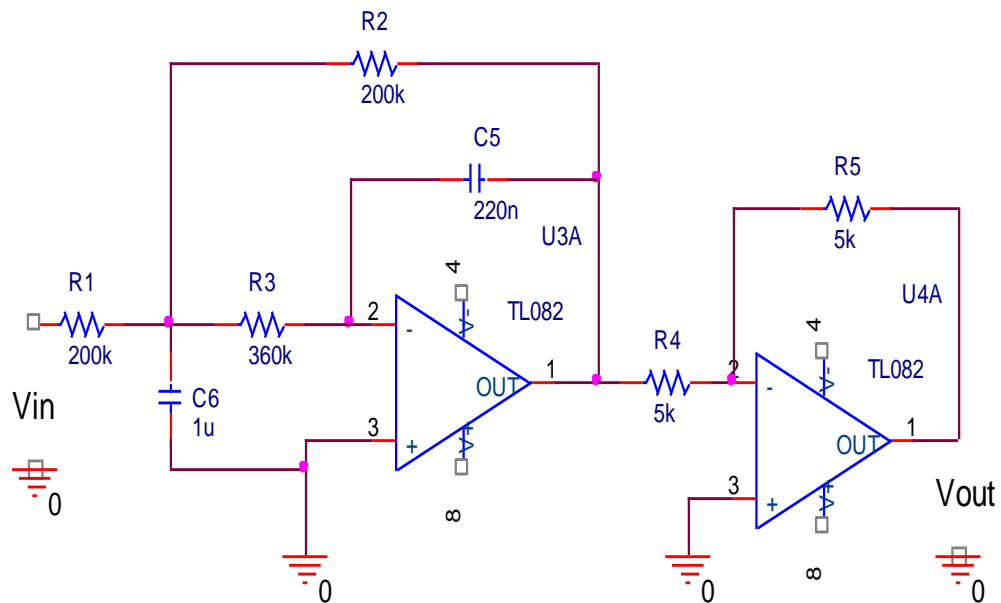


Figura 16. Circuito esquemático filtro pasa bajas.

La respuesta en frecuencia del filtro implementado se visualiza en la figura 17, obtenida por simulación en *Orcad*. Para observar mejor su comportamiento a 60 Hz, que es la principal fuente de ruido, se hace además un barrido lineal al circuito, en el rango entre 10 mHz y 100 Hz.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Orcad*.

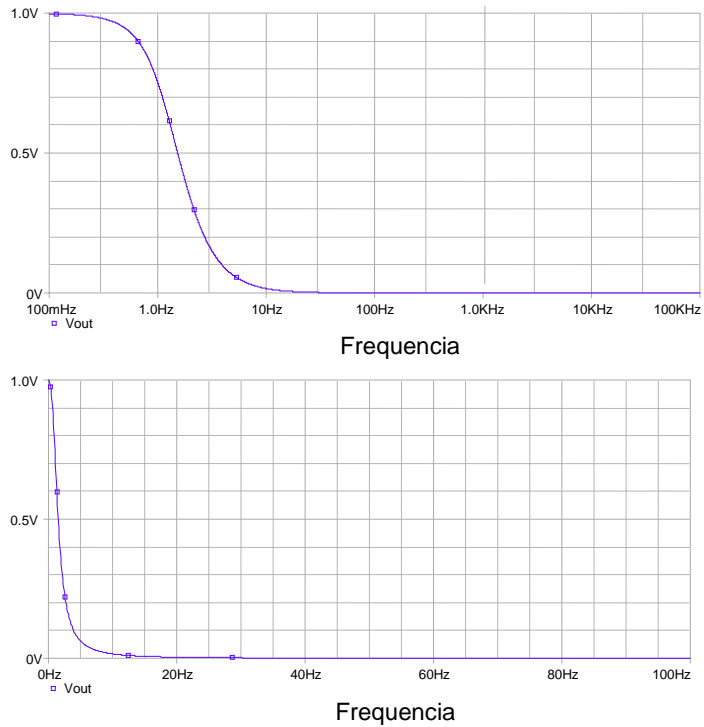


Figura 17. Respuesta en frecuencia de filtro pasa bajas. Arriba barrido logarítmico, abajo barrido lineal.

En la evaluación realizada al filtro implementado se encontró que este aún permite el paso de una pequeña componente de ruido, que tiene una tensión pico a pico de 12 mV. Debido a que la salida de este filtro no es la entrada directa al conversor A/D, pues este pasa primero por un circuito de zona muerta, y que al observar el ruido a la salida de este último, se incrementaba en relación con la salida del filtro, se decidió hacer una segunda etapa de filtrado para entregar la señal lo más limpia posible a la etapa de conversión analógica a digital. Esta vez se optó por un filtro pasa bajas con la misma frecuencia de corte que el anterior (2 Hz), pero de 4 polos para tener una mejor respuesta del filtro en las frecuencias bajas, y que atenúe mejor el ruido de 60 Hz.

El nuevo filtro es de la misma topología que el anterior, pero el segundo *OPAMP*, que en el anterior filtro se encargaba de invertir la señal, es remplazado por otra etapa de filtrado para tener los 4 polos deseados.

#### 4.1.3.3 Circuito de zona muerta

Este circuito fue seleccionado para aprovechar su característica de salida, la cual solamente deja pasar una señal si está por debajo o por arriba de un voltaje de referencia. La finalidad de este circuito es entregar al conversor A/D una señal de tensión correspondiente a un valor de temperatura, solamente cuando esta señal alcance los 2.5 V (aproximadamente 250 °C). Esto se realiza con el fin que el conversor trabaje en el rango de temperaturas de 250 a 750 °C aproximadamente, rango en el cual es requerido el control, sin tener la necesidad de reducir la ganancia de la señal para entregarla al conversor, el cual tiene 5V como máximo referencia. En la figura 18 se muestra el circuito implementado.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Orcad*.

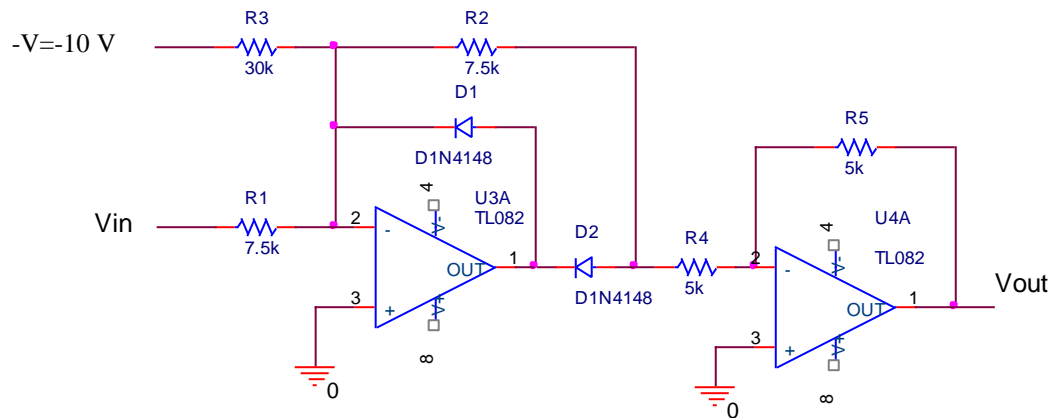


Figura 18. Topología del circuito de Zona muerta con salida positiva, con voltaje de referencia de 2.5V.

La referencia se obtiene por la relación entre las resistencias  $R_3$  y  $R_2$  ( $R_2 = R_1$ ), y la comparación con el voltaje  $-V$ . Como la zona muerta deseada es de a partir de  $2.5V$   $m = R_3/R_2 = 4$ , teniendo  $V_{ref} = -V/m = 2.5V$ . La figura 19 muestra la relación entre voltaje de entrada y voltaje de salida del circuito.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Orcad*.

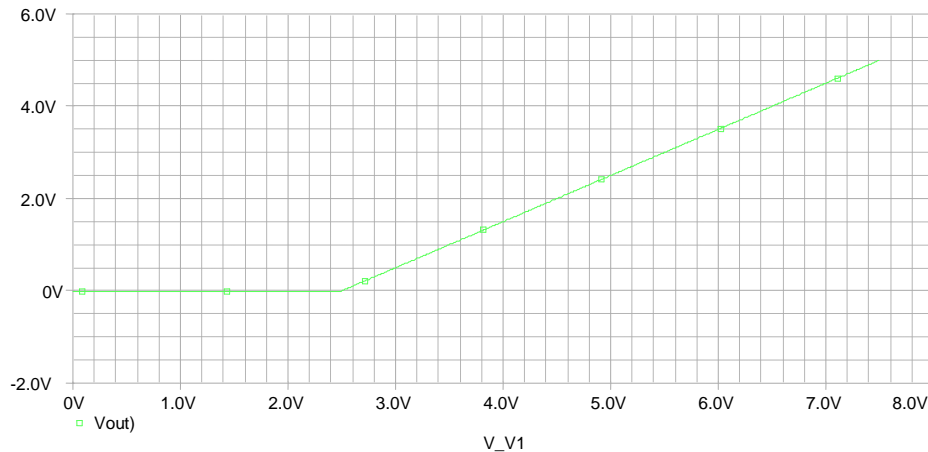


Figura 19. Barrido en DC de circuito de zona muerta.

**4.1.3.4 ADC.** Esta etapa es realizada por el microcontrolador MC9S08JM60 de *freescale*, el cual tiene un algoritmo de aproximación lineal sucesiva con una resolución de 12 bits. El formato de salida se puede ajustar de 8, 10 o 12 bits, de los cuales se seleccionó el de 12 bits para la captura de la señal analógica. Con esta selección, y teniendo como señal de referencia una tensión de 5V, se obtiene una resolución de:

$$\text{Resolución de conversión} = 5V / (2^{12} - 1) = 1,221 \text{ mV.}$$

Teniendo en cuenta que la variación de tensión con respecto al cambio de temperatura entregada por el amplificador de instrumentación es de  $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ , se tiene una resolución de  $0,122 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Para obtener una conversión menos propensa a ruidos, se utilizó como referencia para el conversor una tensión diferente a la aplicada en la alimentación del microcontrolador. El microcontrolador envía un dato de conversión cada vez que este es solicitado por el algoritmo de *Lab View*, encargado de la comunicación USB.

**4.1.3.5 Comunicación vía USB.** Para finalizar la etapa de acondicionamiento de la señal a controlar, esta es enviada por cable USB al computador, el cual se encargará de realizar el control. El microcontrolador JM60 se encarga de realizar esta comunicación, el cual tiene su propio módulo controlador de comunicación de USB (S08USBV1), basado en la especificación de Bus Serial Universal Rev 2.0, con el cual se reemplaza la interfaz de comunicación RS-232 con que se contaba en el anterior proyecto.

El módulo USB del microcontrolador trabaja a una velocidad de 12 Mbps. Para obtener la tensión necesaria para la comunicación USB, se activó un regulador interno de 3.3 V. Se seleccionaron 2 diferentes *End points* (canales de comunicación) que se encarguen de la transmisión de datos desde y hacia el PC, y adicionalmente se maneja el *End point* 0, que se encarga de hacer el enlace con el controlador. La transferencia de datos se hace tipo interrupción. La tabla 1 resume la función de cada *End point*.

Fuente: Autores del proyecto.

| ENDPOINT | DIRECCION           | FUNCIÓN                                |
|----------|---------------------|--|
| 0        | Bidireccional       | Enlace con PC a través de controlador. |
| 3        | PC-Microcontrolador | Captura de dato de ALFA                |
| 4        | Microcontrolador-PC | Envío de dato de conversión A/D.       |

Tabla 1. Función de *End points* en comunicación USB.

Como el microcontrolador se comunica con *Lab View*, se utilizó el software *NI-VISA* de *Nacional Instruments* para, a través de la herramienta *NI-VISA Driver Wizard*, crear el controlador para el dispositivo USB de *freescale*. Una vez creado e instalado el controlador, se diseñó el módulo de comunicación en un VI de *Lab View*, con ayuda de las funciones de comunicación *VISA*. La figura 20 muestra el algoritmo empleado para la comunicación con el microcontrolador

El VI recibe los datos, separa los bits enviados por el microcontrolador, y luego con el nodo de fórmula llamado ajuste de parámetros, se hacen las correcciones debidas para leer el valor real de temperatura, registrarlo, y entregarlo al controlador cuando sea necesario.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Lab View*.

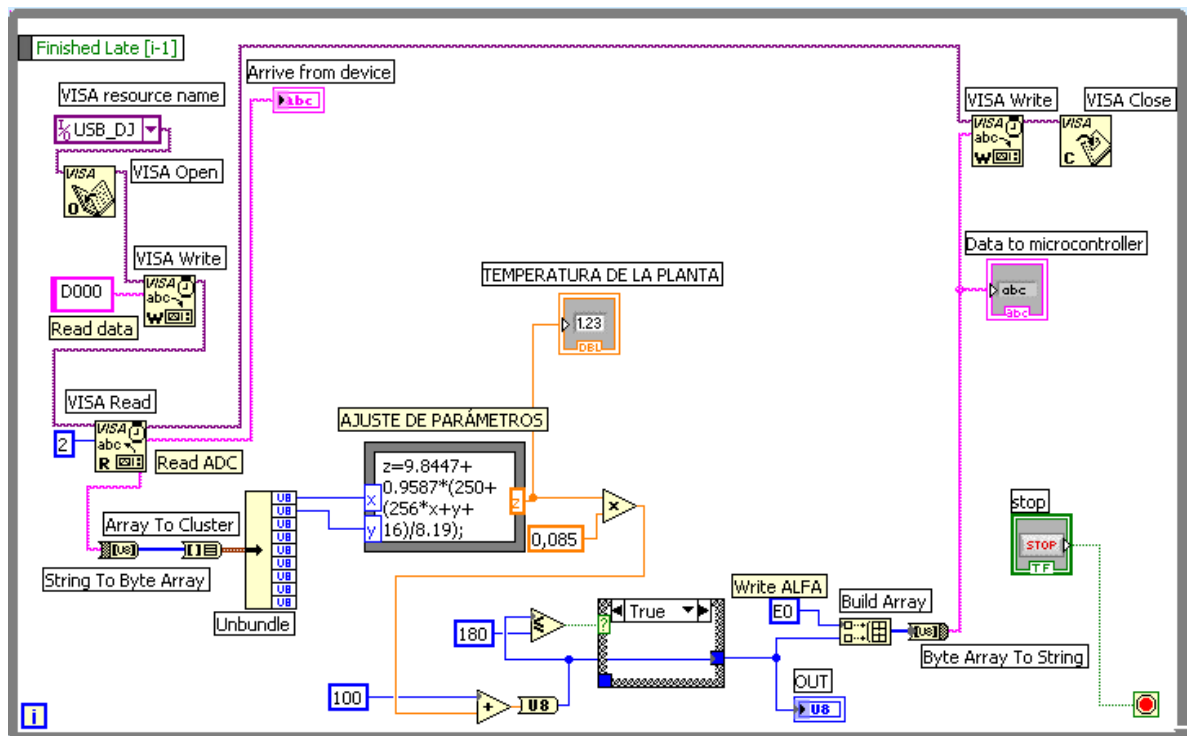


Figura 20. Comunicación con microcontrolador desde VI de *Lab View*.

#### 4.1.4 Controlador

El control es realizado por PC, diseñando para ello un VI en *Lab View*. El algoritmo ilustrado en la figura 21, al recibir el dato de temperatura, lo compara para decidir si se requiere controlar o no. Antes de llegar a los 260 °C, se entrega un ángulo de disparo de 0, para el precalentamiento del horno. A partir de los 260 °C, el dato de temperatura ingresa al lazo de control, el cual es comparado con un *set point* que varía a razón de 3 °C por minuto, y se ajusta su resolución de variación según la velocidad de respuesta del sistema.

El diagrama del algoritmo está ajustado para realizar un control proporcional de la variable, y entregar un valor de alfa que corresponda a una tensión AC para enviar al microcontrolador el cual, junto con un triac, se encargan de entregar la acción de control a la planta. El algoritmo se puede ajustar para cualquier tipo de controlador, dependiendo de los requerimientos del sistema.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Lab View*.

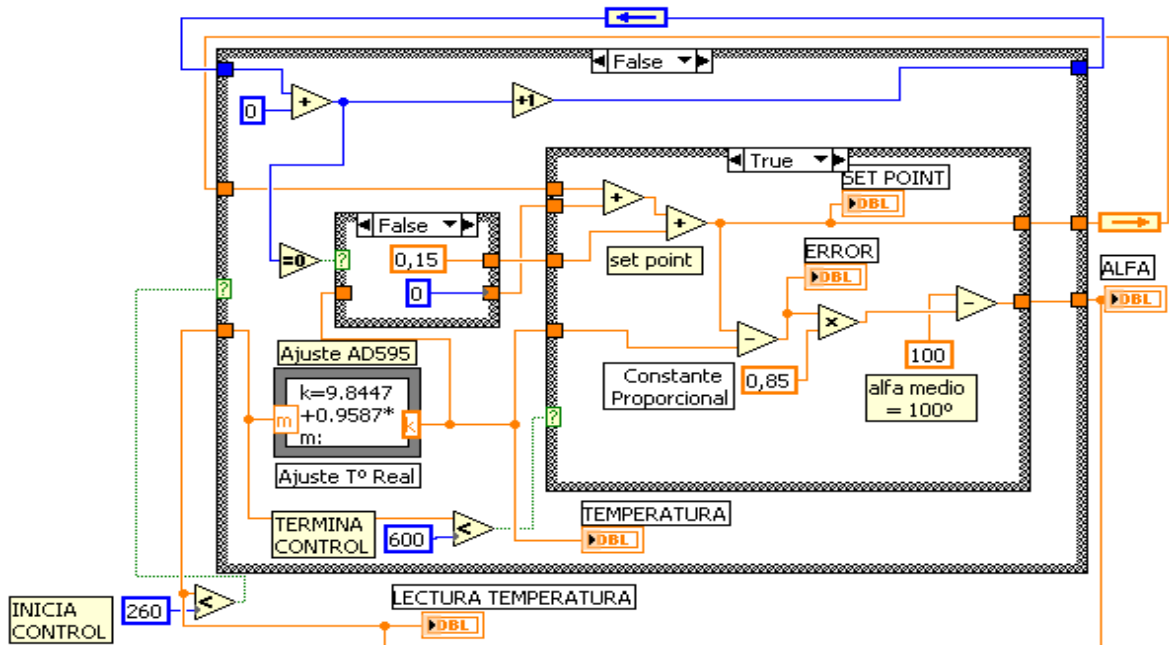


Figura 21. Algoritmo en *Lab View* para control del sistema.

#### 4.1.5 Preaccionador.

Con el fin ejecutar las acciones de control requeridas para mantener la planta en el valor de temperatura deseado, se utiliza un control AC de línea, el cual puede entregar un valor de tensión AC entre 0 y 210 V<sub>RMS</sub> al actuador, dependiendo del valor del ángulo de disparo de un triac. Esta acción realiza conjuntamente por medio del microcontrolador JM60, un circuito detector de cruce por cero, y un circuito de disparo.

**4.1.5.1 MC9S08JM60.** Es un miembro de la familia de microcontroladores de 8 bits HCS08 de *Freescale*. Trabaja con un bus de datos interno de hasta 24 MHz de frecuencia, cuenta con una memoria flash programable de 60KB, 4KB de memoria *RAM* y 256 bytes de *RAM USB*. Entre sus versiones se seleccionó el paquete de 48 pines, el cual viene en encapsulado *QFN* (quad flat no-lead ). Este dispositivo cuenta con:

- **USB** — Dispositivo controlador USB 2.0 *full-speed* (12 Mbps) con *on-chip USB* transmisor-receptor dedicado, regulador 3.3 V y *USBDP* resistor *pull-up*; soporta transferencias tipo control, *interrupt*, *isochronous*, y *bulk*; soporta *endpoint 0* y hasta 6 *endpoints* adicionales.
- **ADC** — 12-canales, conversor analógico a digital de 12-bits con funciones de comparación automáticas y sensor de temperatura interna.
- **ACMP** — Comparador analógico con opción de comparar a referencia interna.
- **SCI** — Dos módulos de comunicación de interfaz serial.
- **SPI** — Dos módulos de periférico de interfaz serial opcionales de 8 o 16-bits.
- **Timers** — Un timer de 2 canales y otro de 6-canales, los 2 de 16 bits con opciones de captura a la entrada, comparación a la salida o *PWM* en cada canal.
- **KBI** — 8-pines con modulo de interrupción por teclado.
- **RTC** — Contador en tiempo real basado en prescalar binario o decimal

- **Entradas/Salidas:** hasta 51 pines de entradas/salidas de propósito general; resistencias de *pull up* seleccionadas por software, cuando se seleccionan entradas; pines *RESET*, *IRQ* y *BKGD/MS*<sup>17</sup>.

El microcontrolador se encarga de recibir el dato del ángulo alfa proveniente del computador en una transferencia *USB*, y entrega la señal de disparo para el triac.

#### 4.1.5.2 Detector cruce por cero

Para sincronizar la señal generada por el microcontrolador con la señal de la red de AC, haciendo el disparo del triac en el ángulo deseado, el microcontrolador se apoya de un circuito de detección de cruce por cero cuya entrada es una muestra de la señal de 220 Vrms de la red, obtenida de un transformador reductor de 220 a 12Vrms. El circuito que se muestra en la figura 22 utiliza el comparador LM311 para entregar una señal cuadrada en la que cada flanco de subida o bajada es un cruce por cero de la señal de la red. La ventaja principal de este circuito, respecto a otras posibles opciones, es que se alimenta con una fuente simple de 5V, y la señal que entrega presenta el comportamiento deseado.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Orcad*.

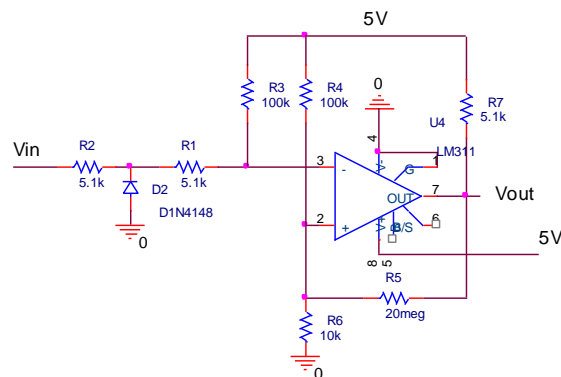


Figura 22. Esquema de circuito detector de cruce por cero.

<sup>17</sup> MC9S08JM60 Series Data Sheet. Rev. 1 11/2007 freescale.com

Fuente: Autores del proyecto.

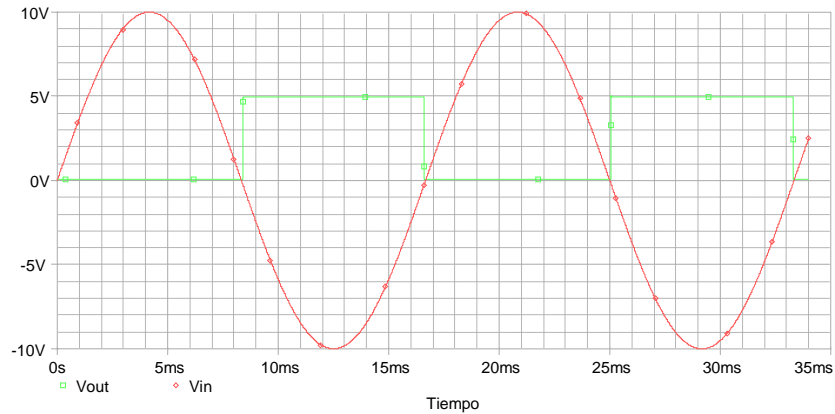


Figura 23. Ondas de entrada y salida de circuito detector de cruce por cero.

**4.1.5.2 Circuito de disparo.** La captura del cruce por cero por parte del microcontrolador se hace usando el pin IRQ, el cual permite detectar una señal por flanco ascendente o descendente, teniendo la posibilidad adicional de detección de nivel alto o bajo. Para el caso particular, cualquiera de las dos opciones es igual, pues cada detección estará alejada  $360^\circ$ . Ya seleccionado el flanco de detección, se habilita la interrupción IRQ, durante la cual se hacen los ajustes de la señal de disparo para cada periodo de la señal de 60 Hz de la red.

Se hacen uso de cuatro canales del Temporizador para habilitar y deshabilitar el pin de salida de la señal de control, según el valor del ángulo de disparo. Cuando se produce una interrupción por IRQ se habilitan las interrupciones de los temporizadores, asignando el último valor de alfa recibido del controlador. Ya con el programa principal del microcontrolador nuevamente en ejecución, se producirán cuatro interrupciones seguidas de los temporizadores antes de que una nueva interrupción por IRQ se produzca; en cada interrupción se deshabilita la interrupción del temporizador respectivo y se cambia la lógica del pin de salida.

El diagrama de tiempos de la figura 24 muestra claramente cada uno de los sucesos realizados en la producción de la señal de disparo, la cual se hace a través del pin PTD7.

En el diagrama de tiempos, la flecha verde indica interrupción en IRQ por detección de cruce por cero, instante en el cual todos los temporizadores se inicializan, y la flecha azul indica la interrupción de cada temporizador. Nótese que los pulsos se mantienen sostenidos, esto con el fin de asegurar el funcionamiento del triac hasta que culmina medio periodo de la señal.

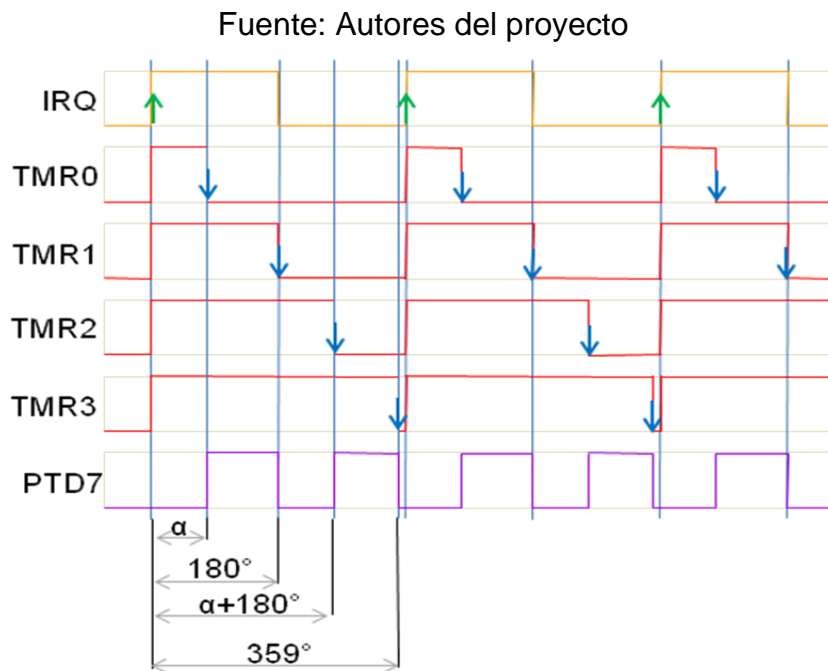


Figura 24. Diagrama de tiempos de señales en microcontrolador.

Una vez generada la señal de disparo, esta se entrega a un opto acoplador, el cual aísla el circuito de control del circuito de potencia. La figura 25 muestra el circuito encargado del disparo al triac para la activación de la carga.

Fuente: Autores del proyecto. Software: Orcad.

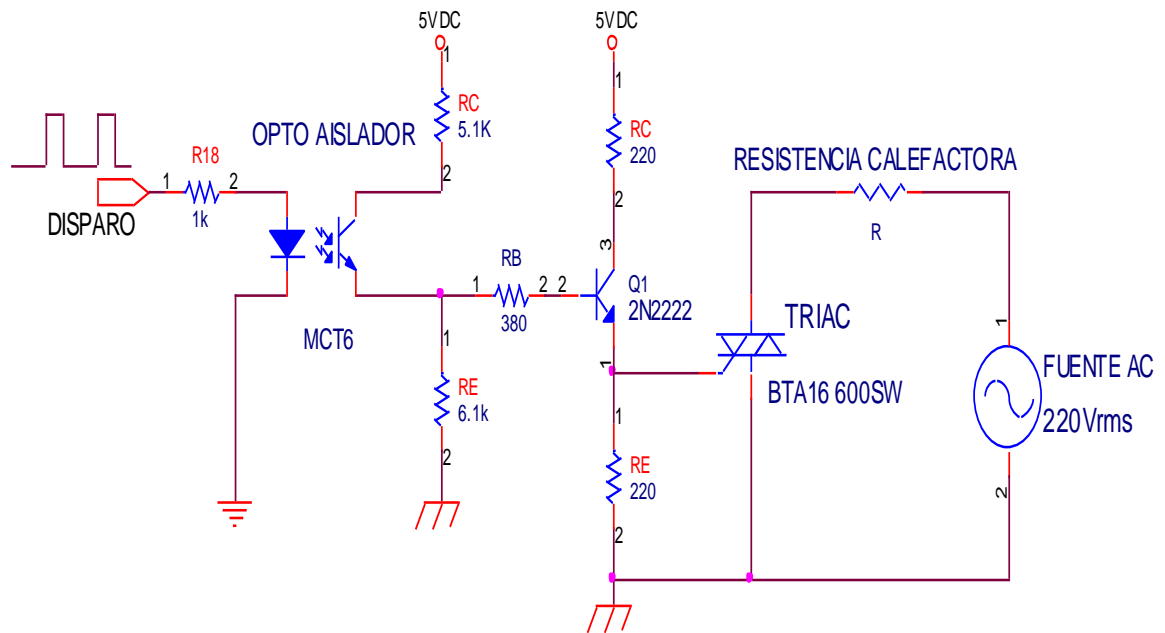


Figura 25. Circuito de disparo para el actuador.

Se utiliza una fuente adicional de 5V para el funcionamiento del circuito de disparo. A la salida del opto transistor se agrega un transistor adicional para entregar suficiente corriente al triac para su correcto disparo. Este transistor polarizó para que en saturación entregue al triac una tensión de 1.6V y una corriente de 10mA.

Ya implementado el circuito completo, se realizaron pruebas con la planta para evaluar su correcto funcionamiento. Primero se realizó un barrido del ángulo de disparo a partir de  $1^\circ$ , variando cada  $5^\circ$  hasta los  $180^\circ$ . Con los datos obtenidos (Ver Anexo 2) se graficó la tensión en la carga en función del ángulo de disparo (figura 26), y se evaluó una función de tendencia.

Fuente: Autores del proyecto.

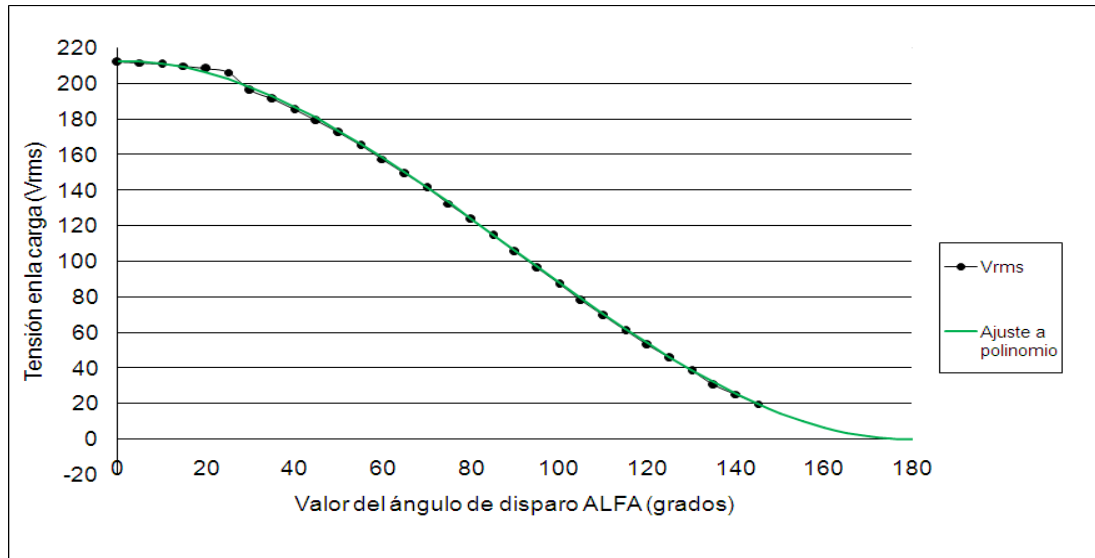


Figura 26. Voltaje rms entregado a la carga en función del ángulo de disparo del TRIAC.

El voltaje rms en función del ángulo de disparo, se pudo aproximar a la siguiente ecuación de tercer grado:

$$V_{RMS} = 0,00007756.\alpha^3 - 0,0209.\alpha^2 + 0,068.\alpha + 212,6$$

Con esta ecuación se calcularon nuevamente los valores de tensión, y al compararlos con los leídos por los instrumentos, se obtuvo un promedio de error del 0,66%. Para estos mismos datos se calculó la función del valor de alfa en función del voltaje rms, pues esta será útil a la hora de realizar los disparos, ya que se calculan parámetros para entregar determinada tensión a la salida, pero el actuador necesita conocer el valor del ángulo  $\alpha$  para el cual se entrega esa tensión. Después de realizar el ajuste de los datos (figura 27), se obtuvo como resultado el polinomio de tercer grado:

$$\alpha = -0,00001377. V_{RMS}^3 + 0,00429. V_{RMS}^2 - 0,98* V_{RMS} + 161,9$$

Fuente: Autores del proyecto.

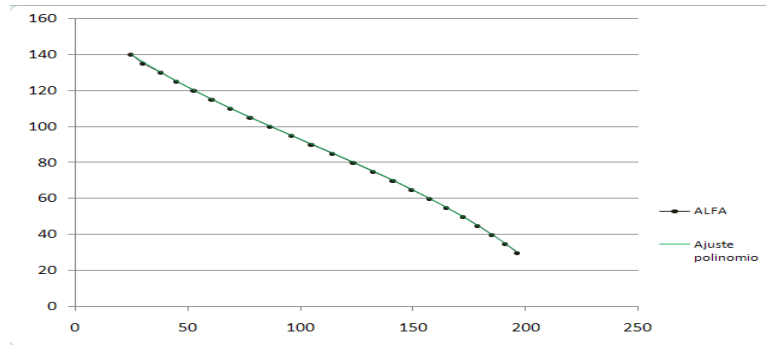


Figura 27. Ángulo de disparo en función del voltaje RMS requerido.

Una segunda prueba realizada fue la variación del ángulo de disparo a medida que se está calentando la planta. Para esta prueba se capturaron los datos a través de la tarjeta de adquisición, y se almacenaron en un archivo generado en un VI de *Lab View*. La Figura 28 muestra este comportamiento. Cada línea vertical indica el momento en que se realizó el cambio en el ángulo de disparo. Nótese que para cada cambio en  $\alpha$  se tiene un tiempo diferente para que la variación en temperatura se acerque a una línea recta. En la primera zona, para  $\alpha=0$ , no se observa una variación inicial, pues antes de  $t = 0s$  se realizaba el precalentamiento con la misma tensión de entrada. El tiempo para el cambio de pendiente depende de qué tan lejos está una tensión respecto a la otra. Para el caso de  $\alpha=140^\circ$  se produce un enfriamiento pues a este ángulo se entrega una tensión de solamente 25 Vrms, para la cual el calentamiento máximo está por debajo de la temperatura en que se encontraba en el momento del cambio de entrada.

Para los datos de la figura 28 se calculó la pendiente de las zonas aproximadamente lineales. Estos resultados muestran el correcto funcionamiento del preaccionador al entregar variaciones de la tensión RMS a la resistencia calefactora, y ayudan a evaluar un valor medio de tensión en el que pueda iniciar a trabajar la planta en el momento de tenerla con el lazo de control.

Fuente: Autores del proyecto.

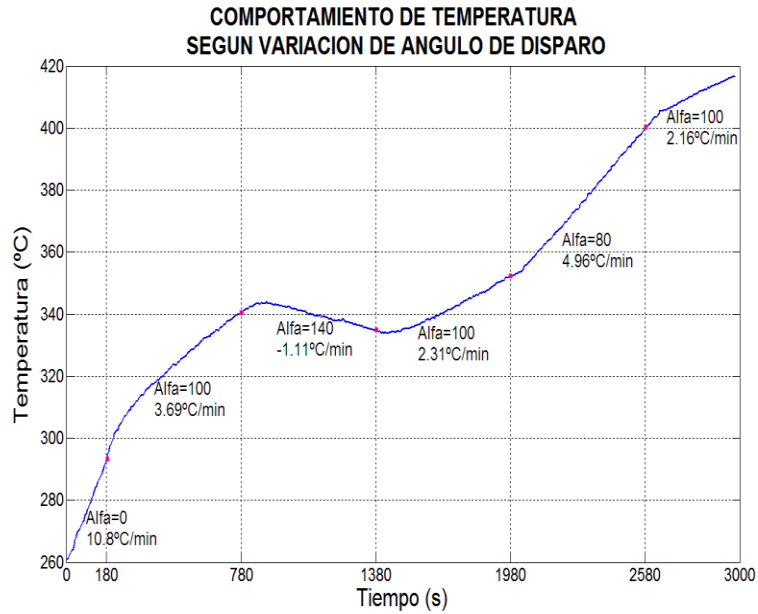


Figura 28. Comportamiento Temperatura según variación ángulo de disparo.

**4.1.6 Esquema general.** En la figura 29 se muestra un diagrama de flujo de señales del conjunto de circuitos utilizados para el control y adquisición de datos de la temperatura de la planta.

Fuente: Autores del proyecto.

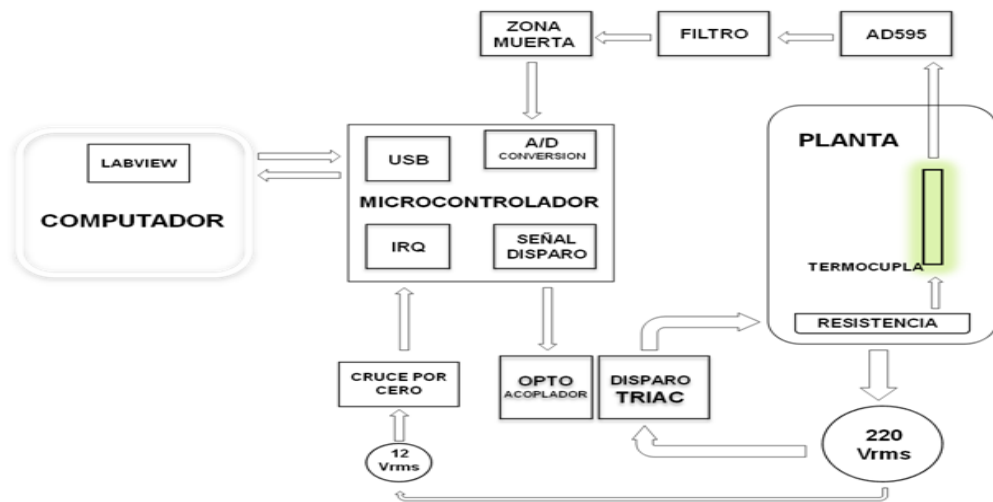


Figura 29. Diagrama de flujo de señales.

Se diseñaron 2 tarjetas *PCB* para el montaje de los circuitos. Una de ellas tiene toda la electrónica de adquisición y transmisión de datos, y la otra está compuesta por la parte de potencia, en donde se encuentra el triac, y las fuentes necesarias para el funcionamiento de la electrónica. Se tienen, una fuente dual de +/-10V para el AD595 y amplificadores operacionales, y de esta sale la alimentación de 5V para el detector de cruce por cero, el microcontrolador y la conversión A/D; y una fuente de 5V para polarizar los transistores involucrados en el disparo del triac.

#### **4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA.**

Para realizar la identificación de la planta, se seleccionó una forma experimental. Debido a que es un sistema térmico, con respuesta monótona creciente similar a un sistema de primer orden, se aplicó un escalón a la planta para observar su respuesta. A partir de la forma de la respuesta de la planta a esta entrada, se puede definir el orden del modelo y encontrar los parámetros necesarios para realizar la sintonización del controlador.

Debido a la forma en que se debe alimentar la planta en su habitual funcionamiento, es útil utilizar como escalón una Tensión de alterna, a determinado Voltaje RMS. Una primera estimación de la forma de respuesta de la planta a un escalón se observa en la figura 11 del perfil de temperatura del horno a plena carga, pero esta no llegó a estabilidad por lo que no es útil para calcular parámetros del sistema.

Para obtener los datos de caracterización, se diseñó un VI en LabView, el cual se encargara de capturar y almacenar los datos de temperatura cada 5 segundos. Un primer ensayo se inició con la planta a temperatura ambiente, se aplicó un escalón de  $70.2V_{RMS}$ , el cual fue ajustado entregando un disparo en  $\alpha=110^\circ$ . En la figura 30 se muestra la respuesta de la planta a esta entrada, en donde el valor en

que se estabilizó la temperatura fue de 444°C, aproximadamente en un tiempo de 23000 segundos.

En la figura 30 se observa que al inicio de la aplicación del escalón se presenta una leve zona en la que el incremento de la variable no es brusco, característico de un sistema de segundo orden, descrito con dos exponenciales decrecientes, cada una con su propia constante de tiempo. Sin embargo, al ser muy leve este comportamiento, se asume que la constante de tiempo de la exponencial decreciente que lo produce es mucho menor que la otra, por lo que se puede aproximar a un sistema de primer orden cual se puede describir por medio de la ecuación:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-t_d \cdot s}}{\tau \cdot s + 1}$$

En donde, K es la ganancia del proceso,  $t_d$  el tiempo de retardo y  $\tau$  la constante de tiempo.

Fuente: Autores del proyecto.

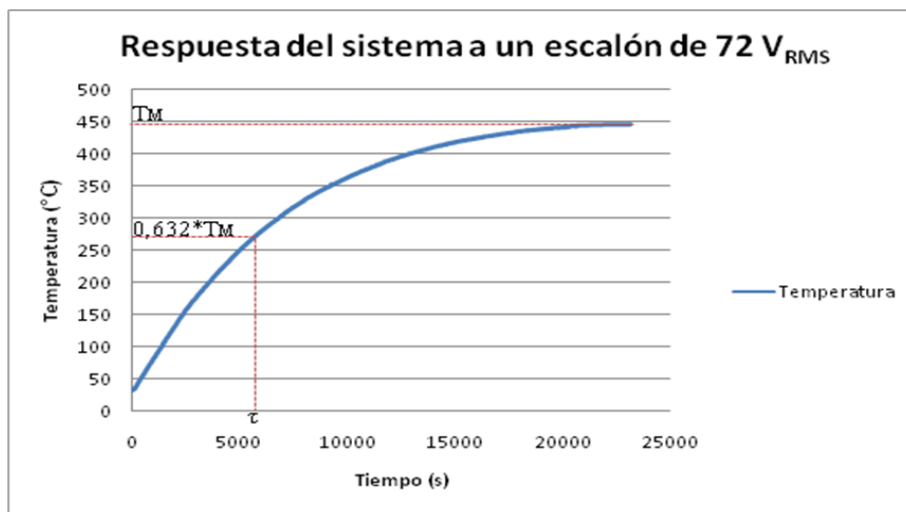


Figura 30. Respuesta del sistema a un escalón de 72 Vrms

A partir de los datos obtenidos en el laboratorio se pueden calcular los valores que caracterizan el sistema, los cuales son la ganancia  $k$  y la constante de tiempo  $\tau$ .

La ganancia se calcula a partir del cociente entre el valor máximo obtenido y el valor del escalón de entrada.

$$K = (T_F - T_i) / 70,2 = 5,88.$$

La constante de tiempo es igual al tiempo requerido para la salida llegue al 63,2% de su valor máximo, de los datos obtenidos este valor es de  $\tau = 5350$  s

Una recomendación en la caracterización de un sistema de control, es que se involucren en la prueba los valores de la salida del sistema que desean ser controlados. Cuando se va a realizar una prueba dilatométrica, se realiza un precalentamiento del horno a carga máxima, y al llega a las temperaturas de interés se comienza a realizar el control. En este caso, la zona de importancia para el control son las temperaturas entre 300 y 600 °C, así que se realizó un segundo ensayo de caracterización, después del precalentamiento de la planta. Para tener un ensayo válido, se esperó a tener una temperatura estable antes de aplicar el escalón, el cual fue de 120.4 Vrms, valor obtenido con un ángulo de disparo de 82°. La temperatura inicial para la prueba fue de 256.62 °C. La respuesta del sistema a esta entrada se observa en la figura 32:

Fuente: Autores del proyecto.

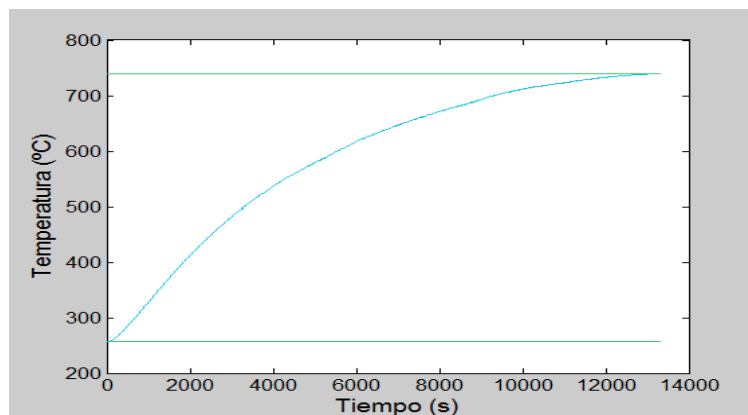


Figura 31. Respuesta de la planta a un escalón de 120,4 Vrms.

Una vez más se utilizó el VI de *Lab View* para recopilar los datos de la caracterización. Aquí se involucran todos los elementos que hacen parte del sistema, por lo que no es necesario caracterizarlos independientemente. En este ensayo, se llegó a estabilidad cuando la planta alcanzó una temperatura de 740 °C, requiriendo para ello de un total de 13400 segundos. En la figura 33 se observa un acercamiento de los 1000 primeros segundos, y se aprecia que la engañosa zona muerta de la figura 30 tiene un comportamiento típico de un sistema de segundo orden sin oscilaciones.

Fuente: Autores del proyecto.

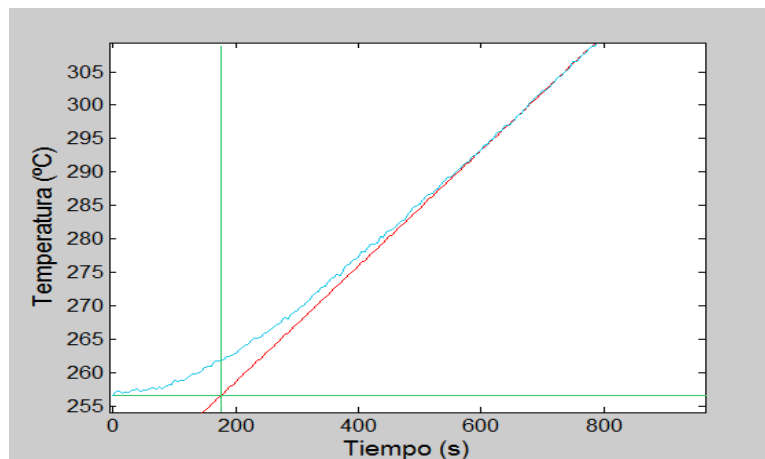


Figura 32. Comportamiento inicial de la planta como respuesta a un escalón.

El sistema se puede modelar con la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K_s}{(S + a)(S + b)}$$

Donde  $a$  y  $b$  son las inversas de las constantes de tiempo del sistema. La representa en el tiempo una función con 2 exponenciales decrecientes:

$$Y(t) = V_p K_s \left\{ \frac{1}{ab} - \frac{e^{-at}}{a(b-a)} + \frac{e^{-bt}}{b(b-a)} \right\}$$

Se realizó el ajuste de los valores obtenidos en la prueba a una exponencial de esta forma, encontrando como parámetros del sistema abierto:

| Ks          | a        | B      |
|-------------|----------|--------|
| 2,59917E-06 | 0,000249 | 0,0026 |

En la figura 34 se grafican los datos de la caracterización y la curva que más se ajustó a los datos. Nótese que la función exponencial en el tiempo se ajusta bien a la curva hasta cerca de un 85% de su valor máximo.

Fuente: Autores del proyecto.

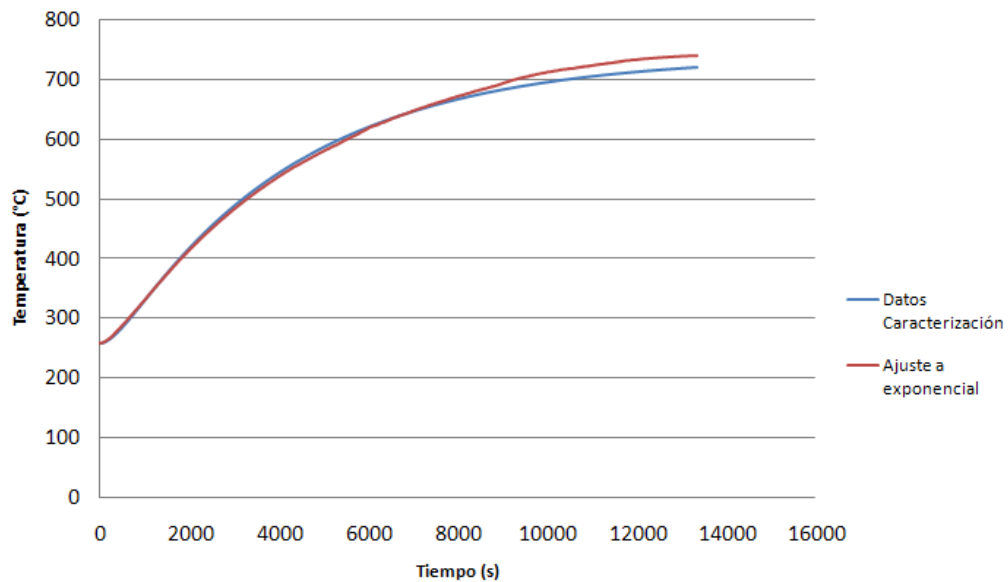


Figura 33. Ajuste de curva de caracterización a función exponencial.

Se observa gran variación entre el modelo matemático obtenido y la curva de caracterización, en cerca del 30% final, por lo que no es conveniente realizar algún cálculo de compensación con estos parámetros.

Debido a la forma en S de la respuesta al escalón de la planta, puede emplearse el método propuesto por *Zieger* y *Nichols* para determinar los parámetros para el controlador. Encontrando el punto de inflexión de la curva, se ubican las medidas necesarias para aplicar el método (figura 35), y con ayuda de la tabla 2 se calculan las constantes proporcional, derivativa e integral para la compensación:

$$G_C(s) = K_p(1+1/T_i s+T_d s)$$

Fuente: *Katsuhiko Ogata*. Ingeniería de control moderna.p684

| Tipo de controlador | $K_p$    | $T_i$    | $T_d$  |
|---------------------|----------|----------|--------|
| P                   | $T/L$    | $\infty$ | 0      |
| PI                  | $0.9T/L$ | $L/0.3$  | 0      |
| PID                 | $1.2T/L$ | $2L$     | $0.5L$ |

Tabla 2. Parámetros del controlador.

Fuente: Autores del proyecto.

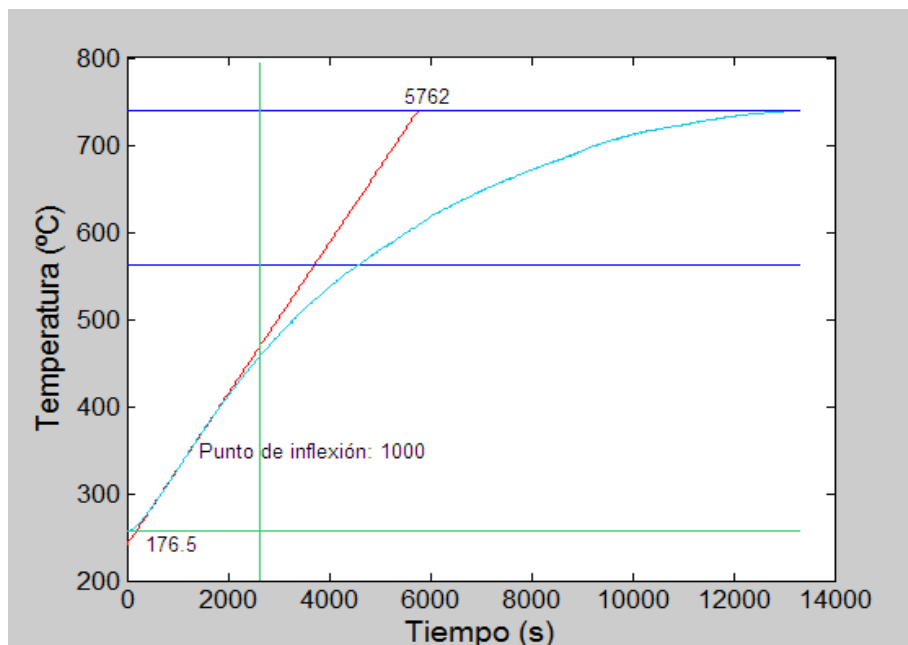


Figura 34. Ubicación de parámetros para aplicar método Zieger-Nichols.

Los valores obtenidos a través de la gráfica son:

$$L = 176,5 \text{ s}$$

$$T = 5585,5 \text{ s}$$

$$K = 483,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

A partir de estos parámetros se obtienen los siguientes valores para las constantes del controlador.

Fuente: Autores del proyecto

| <b>Tipo de controlador</b> | <b><math>K_p</math></b> | <b><math>T_i</math></b> | <b><math>T_d</math></b> |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>P</b>                   | 31,65                   | $\infty$                | 0                       |
| <b>PI</b>                  | 28,48                   | 588,33                  | 0                       |
| <b>PID</b>                 | 37,98                   | 353                     | 88,25                   |

Tabla 3. Cálculo de los parámetros del controlador.

## 5. RESULTADOS

A continuación, se realiza una descripción de las pruebas efectuadas tanto en el sistema de medición de desplazamiento como en el de control de temperatura. Asimismo, se muestran los ajustes y las condiciones finales del sistema global implementado.

### 5.1 SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO

Se hicieron 3 pruebas esencialmente: a. medición del tiempo de ejecución; b. seguimiento de un patrón; c. estimación de la precisión del sistema.

Para medir el tiempo de respuesta, se programó en *Lab View* un sub VI, que permite calcular en segundos, cuánto demora en ejecutarse un algoritmo dado. Se corre el programa un número de veces determinado, y se mide el tiempo empleado. De esta manera se calcula el valor promedio de ejecución del programa. Como primera medida se estima el tiempo necesario para abrir la configuración con los parámetros de la cámara, además de capturar la imagen, junto con la ubicación, medición y conversión a coordenadas reales de cada una de las muestras de carbón. El tiempo es de 1,9868 s. Ahora, se debe restar el tiempo que se demora en cargar las especificaciones de la cámara, puesto que esta etapa sólo se realiza la primera vez que se ejecuta el programa en conjunto. El resultado es de 0,6026 s, con lo cual, el tiempo de ejecución del algoritmo de medición de desplazamiento es de 1,3849 s.

Para observar la forma en que se sigue un *template*, se utilizó un reloj convencional, que fue ubicado frente a la cámara CCD. En el extremo del segundero, se ubicó un patrón, el cual debía ser localizado de manera precisa durante todo el recorrido. La prueba tiene una duración de un minuto, durante la

cual, se hace un seguimiento de los valores de las coordenadas  $(x,y)$ , que ubican al centro de masa del patrón. Además, los valores de  $x$  e  $y$  fueron proporcionados tanto en coordenadas en pixeles como en coordenadas reales para corroborar el adecuado desempeño del sistema (el recorrido debía de ser el mismo).

Las variaciones en la posición  $x$  e  $y$  en función del tiempo presentan una forma senoidal. Sin embargo, la una está atrasada con respecto a la otra  $90^\circ$ . Al graficar  $x$  vs  $y$ , se observa el desplazamiento neto del patrón, el cual, debe corresponder a un círculo, que representa la trayectoria del segundero. En la figura 35 se evidencian los hechos descritos.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Lab View*.

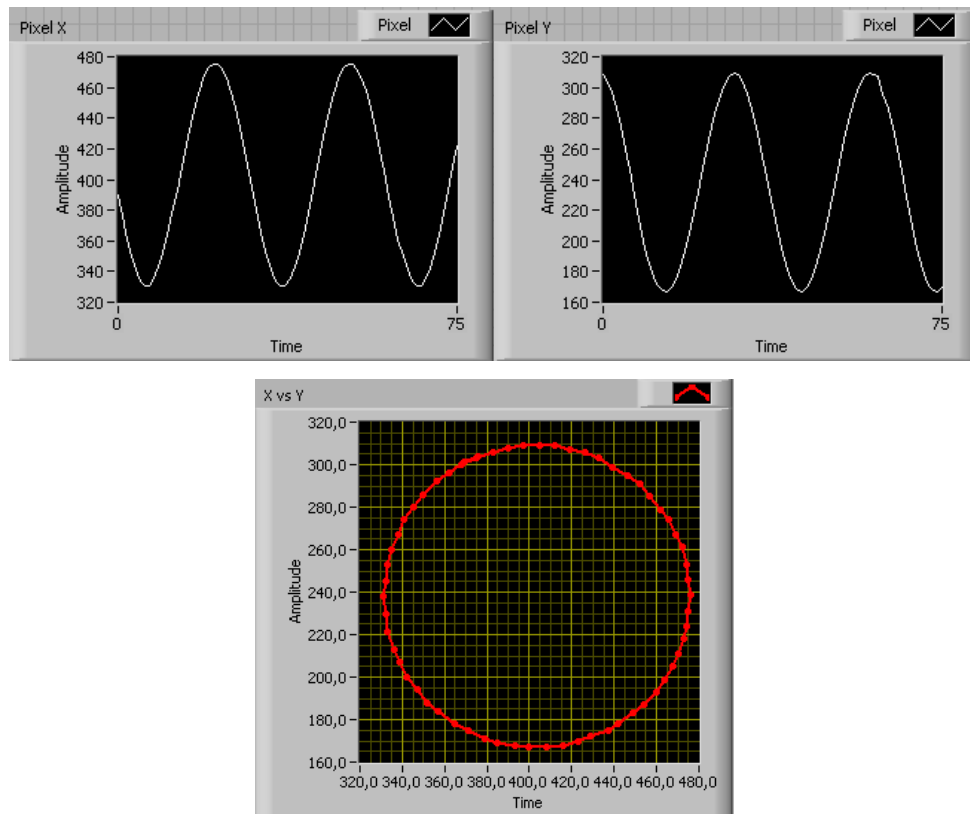


Figura 35. Medición del tiempo de respuesta del sistema.

Para estimar la precisión del sistema, se tienen en cuenta 2 aspectos:

- Calcular la posición del centroide teniendo las muestras estáticas. Esto permite hacer un seguimiento de qué variación en píxeles se obtiene a la hora de encontrar las coordenadas del centro de masa de cada patrón. La variación obtenida es de  $\pm 1$  píxel. A través de esta prueba se logra estimar que la distancia real entre 2 píxeles de la imagen es de 0,4 mm.
- Comparación de distancias reales conocidas con la distancia calculada con el sistema de medición de desplazamientos.

## **5.2 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA**

Para evaluar el funcionamiento del sistema de control de temperatura se seleccionó un controlador proporcional, escogiendo como constante  $K_P = 31.65$ , valor obtenido al aplicar el método de Zieger-Nichols a la caracterización de la planta. Se realizó un precalentamiento del horno hasta los  $265^{\circ}\text{C}$ , temperatura a la cual se inició el control, aplicando una consigna con un incremento de  $0.25^{\circ}\text{C}$  cada cinco segundos, tiempo fijado como periodo de muestreo para el sistema de control. Se tomaron muestras de temperatura cada 5 segundos, hasta un total de 1280 muestras, cuya gráfica con respecto al tiempo se observa en la figura 36.

Fuente: Autores del proyecto.

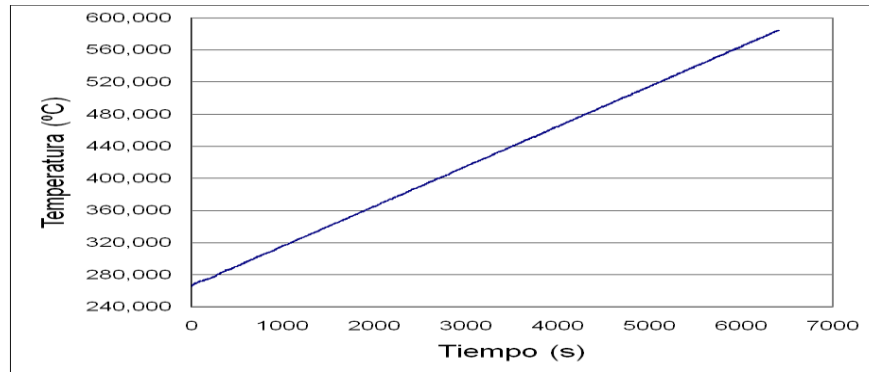


Figura 36. Gradiente de temperatura obtenido con controlador proporcional.

En la figura 37 se observan los primeros 1000 segundos del control, en donde se aprecia que en la parte inicial hay mayores variaciones de la temperatura real con respecto a la deseada, puesto que antes de iniciado el control el gradiente de temperatura es cercano a los  $10^{\circ}\text{C}$  por minuto. Sin embargo, estas mayores variaciones solamente se dan hasta temperaturas inferiores a los  $290^{\circ}\text{C}$ , y el gradiente debe estar controlado a partir de los  $300^{\circ}\text{C}$ , según los requerimientos de la prueba de dilatometría. Es importante anotar que los rizados observados en los datos de la temperatura de la planta, corresponden a pequeñas perturbaciones (ruido) en la toma del dato analógico en el conversor A/D, pero la zona central de estas variaciones representa la temperatura real en la planta.

Fuente: Autores del proyecto.

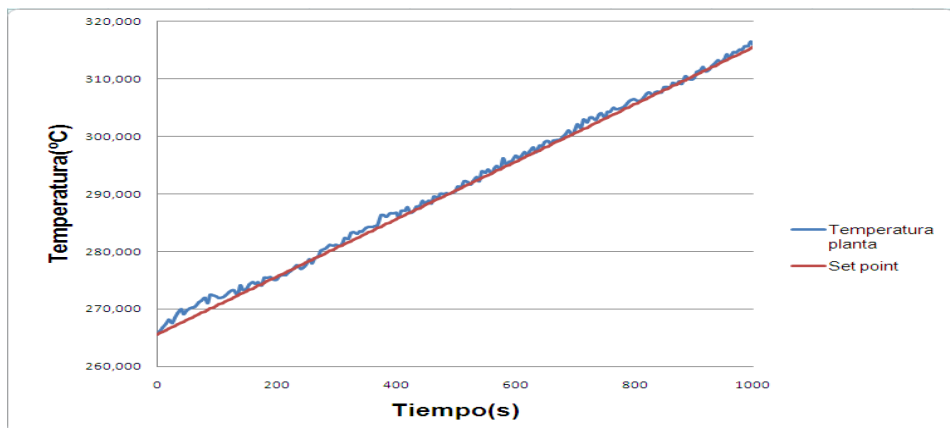


Figura 37. Temperatura de planta vs salida deseada en los primeros segundos.

Para calcular el error de los datos obtenidos con respecto a la temperatura deseada, se evaluó el error del dato tomado de temperatura vs la consigna aplicada. Los datos de error de las 1280 muestras se promediaron obteniendo una media de error de 0.04%, y una varianza del error del 3.96%. Como se probó con un control proporcional, este difícilmente puede mantenerse en el valor deseado del *set point*, pero puede seguirla permitiendo cumplir con el gradiente de temperatura requerido en la prueba dilatométrica.

Otra forma de evaluar el gradiente de temperatura obtenido es calculando una línea de tendencia de los datos, y analizando sus parámetros. Los 300 °C se alcanzan a los 680 segundos de iniciado el control, y a partir de allí se calcula la línea de tendencia, hasta los 580°C. Se obtuvo la función lineal:

$$T = 0,049712*t + 266,155$$

Este valor se obtuvo con un  $R^2$  de 0.999977, lo cual muestra gran similitud entre el comportamiento medio de los datos y la línea de tendencia obtenida. De la función de la temperatura con respecto al tiempo obtenida, el término independiente representa la temperatura a la cual se inició el control, la cual es realmente de 255.56°C, y el valor de la pendiente representa el gradiente de temperatura por segundo. A partir de estos resultados se determina que el gradiente de temperatura real obtenido con el controlador proporcional es de 2.983 °C/minuto, el cual tiene un error de 0.57% con respecto al valor de gradiente de 3 °C/minuto deseado, con lo cual se satisfacen los requerimientos de temperatura para la prueba dilatométrica.

Cabe mencionar, que utilizando el mismo sub VI de estimación del tiempo de ejecución se obtiene un lapso de 12,8 ms.

### 5.3 CURVA DE DILATOMETRÍA

Una vez se corrobora el correcto desempeño de cada uno de los sistemas desarrollados e implementados, se procede a realizar una prueba de dilatometría. Esta prueba se efectuó para 2 tipos de carbón diferentes, 2 muestras por cada uno. La longitud de cada muestra es de 6 cm y estas se preparan a partir de un molde predefinido para la prueba. En la siguiente figura se muestra un lapso de tiempo en el cual se evidenciaron cambios en la longitud de las muestras. Las variaciones en la longitud de las muestras se empezaron a evidenciar a partir de los 350 °C.

Fuente: Autores del proyecto. Software: *Lab View*.

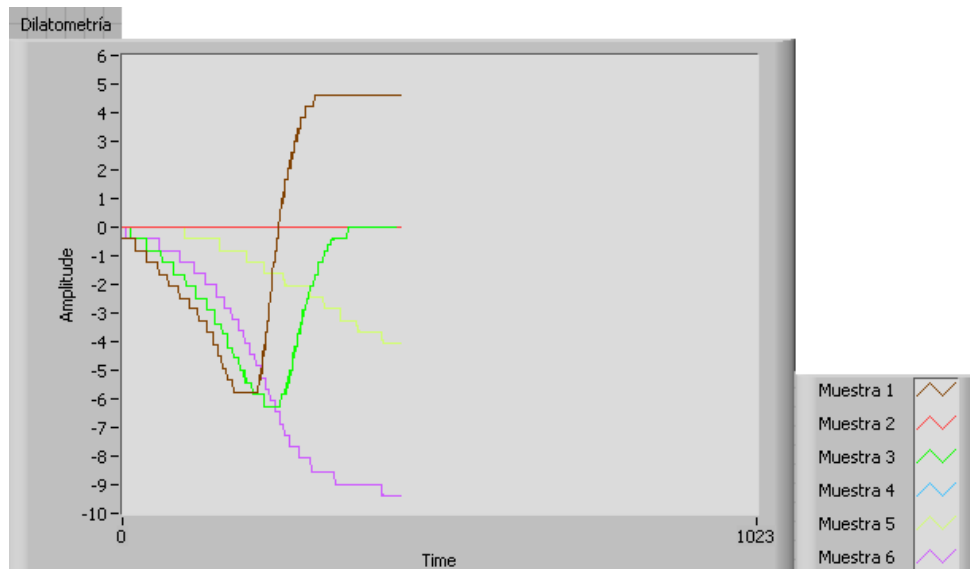


Figura 38. Curva de dilatometría para 4 muestras de carbón.

## 6. OBSERVACIONES

Como primera instancia se realizó una revisión bibliográfica que permitió conocer las características principales de la prueba de dilatometría en carbones, así como las especificaciones técnicas de la misma.

A continuación, se procedió a analizar cada una de las etapas diseñadas e implementadas en el proyecto “Sistema de medición de desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu”. Se encontraron algunas falencias, con lo cual, se decidió efectuar un rediseño de los sistemas de registro de desplazamiento y control de temperatura. Las premisas en esta fase de rediseño fueron robustez y modernización. Sin embargo, el sistema de adquisición de imágenes (a excepción del ambiente controlado de iluminación) y el instrumento de medición de la temperatura se dejaron de la manera planteada inicialmente, después de la ejecución de pruebas que permitieron corroborar su buen desempeño. Se debe valorar la buena selección de los equipos anteriormente mencionados.

Cabe añadir que no se halló registro alguno de los resultados de alguna prueba de dilatometría elaborada con el proyecto anterior, de manera que no fue posible realizar las comparaciones pertinentes con la metodología propuesta en el presente proyecto.

En segunda instancia, se dividió el sistema general en sus 2 componentes: registro de desplazamiento y control del gradiente térmico necesario para la prueba.

Después de estudiar el algoritmo propuesto en el proyecto anterior, se resolvió buscar diferentes alternativas para el cálculo de las variaciones en la posición de

los pistones que ejercen carga sobre las muestras de carbón. Esto con el objetivo de hacer lo más inmune posible al sistema de las condiciones de iluminación desfavorables. Una comparación en tiempo de ejecución entre el uso de operaciones de morfología y de segmentación contra búsqueda de patrones, arroja resultados muy similares (aproximadamente 37 ms).

En cuanto al sistema de control de temperatura, el aspecto fundamental a considerar fue el de modernizarlo. La interfaz RS-232 fue reemplazada por el protocolo de comunicación USB. En este sistema se logran ver algunas de las capacidades y facilidades que ofrecen los microcontroladores a la hora de controlar diferentes procesos.

Se debe además destacar el software *Lab View*, con sus librerías especializadas en la adquisición y procesamiento de señales e imágenes. Este programa ofrece al usuario una interfaz gráfica “amigable” a la hora de diseñar algoritmos que permiten la supervisión y automatización de procesos.

## 7. CONCLUSIONES

- En el área de la dilatometría se tiene una variedad de materiales, para los cuales se requiere un análisis de las deformaciones sufridas debidas a los efectos en las variaciones de temperatura. El procesamiento digital de imágenes resulta apropiado en pruebas que requieren un sistema de medición no invasivo, y cuando se tiene un rango de variaciones suficiente para ser captado por el dispositivo de captura disponible.
- La limitante en la precisión de la medición de desplazamientos por medio del tratamiento digital de imágenes es el hardware (cámara y *frame grabber*), pues existe una dependencia directa de la calidad de la medida con el tamaño del pixel. Para este caso particular de este proyecto, el mínimo desplazamiento obtenido es de 0.4 mm, que corresponden a la conversión en unidades reales de la distancia entre 2 pixeles. Lo anterior es válido para una distancia de trabajo de 15 cm entre el lente y una muestra ubicada al frente de la cámara.
- Se evaluaron diferentes soluciones al problema de la medición de desplazamiento, utilizando operaciones y técnicas que permiten extraer objetos de interés de una imagen. Dependiendo de las condiciones de iluminación, del tiempo de ejecución del algoritmo, entre otros parámetros, se puede estimar qué tipo de procedimiento se hace más adecuado que otro para una aplicación específica.
- La implementación del sistema de adquisición y control de temperatura, permite observar las ventajas del uso de microcontroladores para soluciones a diferentes tipos de problemas, ya que con un único chip se realiza la conversión analógica a digital, la transmisión bidireccional de datos desde y hacia el computador vía USB, y el ajuste de temporizadores para la entrega de los pulsos de disparo para el control AC de línea.

- Se logró obtener un gradiente de variación de temperatura de  $3^{\circ}\text{C}$ , con un error menor al 1%, lo cual resulta adecuado para cumplir con las especificaciones requeridas para la prueba de dilatometría en carbones.
- Con el desarrollo del proyecto se deja el dilatómetro de carbón en funcionamiento y a disposición del laboratorio de corrosión de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, con el que podrán realizar análisis de las características plásticas de los carbones, como práctica para los estudiantes de la escuela, o como servicio a empresas que así lo requieran.

## 8. RECOMENDACIONES

- Realizar el control de temperatura por medio del microcontrolador.
- Utilizar una cámara USB con mayor resolución, de manera que se obtengan medidas más precisas.
- Diseñar e implementar aplicaciones industriales, que se supervisen y controlen procesos a través de *Lab View*.
- Construir prototipos para aplicaciones de visión artificial que permitan evaluar calidad de diferentes productos, ya sea calculando áreas, localizando imperfectos, entre otras.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bonilla Muriel Nohora Viviana, Sistema de medición de desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Auidert-Arnu.
- Contreras Sanchez Omar, Villamizar García Libardo, Estudio del yacimiento carbonífero “La Quiracha” (Norte de Santander) para producción de coque metalúrgico.
- *Camera Settings for Dimensional Inspection Using Displacement and Quantization Errors*, de Kevin L. Crosby, Christopher C. Yang, Frank W. Ciarallo y Michael M. Marefat.
- *Motion Detection Independent of the Camera Movement with a Log-Polar Sensor*, de José A. Boluda, Juan Domingo, Fernando Pardo, Joan Pelechano.
- Mora Cruz Sandro, Plataforma para el Procesamiento Digital de Imágenes Orientado al Control Automático de Procesos, director Msc. Jaime Guillermo Barrero Pérez, 2002, Universidad Industrial de Santander.
- Barrera Garavito Raúl, Guerrero Antolínez Javier Control Digital de Temperatura con Micro-controlador. Diseño y Construcción, 1990, Universidad Industrial de Santander.
- Pitt G. J., Millward G. R., *Coal and Modern Coal Processing: an Introduction*, Academic Press, New York, Primera Edición, 1979.
- Jähne Bernd, *Digital Image Processing*, Springer, Alemania, Quinta Edición, 2002.

- Pratt William K., *Digital Image Processing*, Wiley-Interscience Publication, New York, Tercera Edición, 2001.
- Blanchet Gérard, Charbit Maurice, *Digital Signal and Image Processing using Matlab*®, ISTE Ltda, 2006.
- Ogata K., *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice Hall, México, Tercera Edición, 1998.
- Kuo, Benjamin C., *Analysis and Synthesis of Sampled-Data Control Systems*, New Jersey: Prentice-Hall, 1963.
- F.L. Lewis, *Applied Optimal Control and Estimation*, Prentice-Hall, 1992.
- Ogata K., *Discrete-time Control Systems*, Prentice Hall International Editions, US.
- Muhammad H. Rashid, *Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y aplicaciones*, Pearson Education, Segunda Edición, 1995.
- Lab Vlew User Manual.
- Imaq Vision Concepts Manual.
- Imaq Vision Builder Release Notes.

## **ANEXOS**

## Anexo 1: Procesamiento digital de imágenes

### A.1.1. Generalidades: ¿Por qué el procesamiento digital de una imagen?

La observación visual ha sido, desde los inicios de la ciencia y de la vida misma, el sentido predominante en el ser humano para conocer y entender su entorno. Debido a las limitaciones del lenguaje de ese entonces, la descripción verbal (sonidos) y los dibujos se convirtieron en la mejor alternativa a la hora de documentar los resultados de vivencias y experimentos. Años de evolución permitieron al hombre desarrollar habilidades de comunicación (habla y escritura) para retratar con mayor detalle los hechos que se desarrollaban a su alrededor. El siguiente gran paso fue la invención de la fotografía, que permitió la documentación objetiva de los diferentes resultados. Tres disciplinas en particular tuvieron un gran crecimiento: astronomía (se pudieron medir posiciones y magnitudes de estrellas), fotometría (se produjeron mapas topográficos a partir de imágenes aéreas) y física de las partículas (buscando a través de incontables imágenes provenientes de una cámara o cuarto de burbujas de hidrógeno se lograron descubrir varias partículas elementales de la física)<sup>18</sup>. Sin embargo, el tiempo que consumía analizar estas fotografías era demasiado elevado. Para suplir esta deficiencia, se diseñaron diversos dispositivos opto-mecánicos, pero tenían la desventaja de que eran adaptados para una aplicación específica, y bajo condiciones de operación distintas, su desempeño se veía limitado. Por estas razones, el análisis de imágenes no cobró la importancia que hoy posee.

Gracias a los gigantescos avances tecnológicos logrados en la adquisición de imágenes y el poder de procesamiento de datos de las estaciones de cómputo, se vive sobre una nueva revolución. El procesamiento de imágenes ha permitido el estudio de fenómenos y procesos que resultarían difíciles de analizar a través de métodos convencionales de medida. Las nuevas técnicas y dispositivos utilizados,

---

<sup>18</sup> JÄHNE Bernd, DIGITAL IMAGE PROCESSING. Capítulo 1.

han logrado incursionar en otras áreas del conocimiento donde se han logrado importantes avances, como medicina, geología, astronomía, entre otros.

Las técnicas de procesamiento de imágenes cobran cada vez más importancia, en la medida en que complementan las características y propiedades del sistema de visión humano. Por ejemplo, si se tienen líneas y círculos de tamaño muy similar, el sistema humano logra identificar y estimar un valor para longitudes y áreas, pero sin lograr una exactitud que pudiera diferenciar dichos objetos plenamente (en cuanto a magnitudes); sin embargo, esta tarea resulta sencilla para un algoritmo que se encargue de hacer cálculos de manera rápida y precisa. Por otra parte, si lo que se desea es diferenciar la forma y textura de las figuras ya mencionadas, el sistema de visión humano resulta ser una herramienta muy poderosa.

Aunque las técnicas de procesamiento son cada vez más complejas y presentan notables mejorías, pasará un buen tiempo antes de que estos algoritmos sean capaces de entender las imágenes como lo hace el hombre y tengan la capacidad de reaccionar inteligente y flexiblemente en tiempo real. Cabe añadir que los últimos grandes desarrollos en la visión en computadoras han sido realizados a partir del estudio y entendimiento del sistema de visión humano<sup>19</sup>.

### **A.1.2. ¿Qué es una imagen digital?**

Una imagen se puede definir como una función de 2 dimensiones,  $f(x, y)$ , donde  $x$  e  $y$  son coordenadas espaciales, y la amplitud de  $f$  en cualquier par de coordenadas  $(x, y)$  es llamada intensidad o nivel de gris en ese punto de la imagen<sup>20</sup>. En procesamiento digital de imágenes, un sensor se encarga de transformar una imagen en un número discreto de píxeles. Este sensor asigna a

---

19 GONZALEZ Rafael C., WOODS Richard E., DIGITAL IMAGE PROCESSING. Capítulo 1.

20 Imaq Vision Concepts Manual. Capítulo 1.

cada pixel una localización numérica y un nivel de gris o valor de color que especifica el brillo o el color de dicho pixel.

Una imagen digital posee 3 propiedades básicas:

- Resolución: consiste en el número de filas y columnas de pixeles que tiene una imagen. En una imagen de  $m \times n$ , existen  $m$  pixeles a lo largo del eje horizontal, mientras que en el eje vertical hay  $n$  pixeles.
- Nitidez: indica el número de sombras que se pueden observar en una imagen. La profundidad del bit en una imagen, revela el número de bits utilizados para codificar el valor de un pixel. Por ejemplo, para  $n$  igual a 8 bits, el pixel puede tomar 256 valores diferentes, abarcados entre 0 y 255.
- Número de planos: corresponde al número de matrices de pixeles que forman la imagen. Una imagen en escala de grises o en *pseudo color* está compuesta por un solo plano, mientras que una de color verdadero se conforma de 3 (planos rojo, verde y azul).

Cabe realizar una mención extra acerca de los diferentes espacios de color. Estos permiten representar el color de diferentes maneras. Un espacio de color es un sub-espacio dentro de un sistema de coordenadas tridimensionales donde cada color es representado por un punto<sup>21</sup>. Los espacios de color facilitan la descripción de colores entre personas, máquinas y software.

Diversas aplicaciones e industrias utilizan diferentes números de espacios de color. Los seres humanos perciben el color de acuerdo a los parámetros de nitidez, matiz e intensidad, mientras que los computadores lo hacen a partir de una

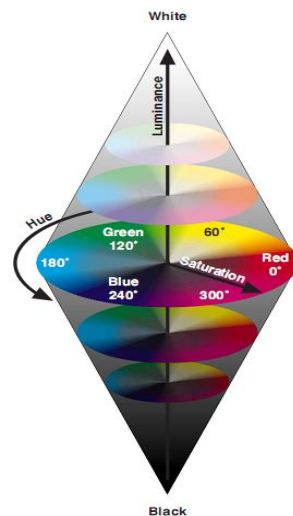
---

<sup>21</sup> Imaq Vision Concepts Manual. Capítulo 1.

combinación de azul, verde y rojo. La siguiente lista muestra los espacios más comunes:

- RGB: basado en rojo, verde y azul. Usado por los equipos de cómputo para mostrar imágenes.
- HSL: fundamentado en matiz, saturación y luminancia. Utilizado en diversas aplicaciones de procesamiento de imágenes.
- CIE: cimentado en nitidez, matiz y colorido. Definido por la *Commission Internationale de l'Éclairage* (Comisión Internacional de Iluminación) como las diferentes sensaciones de color que el cerebro percibe.
- CMY: basado en cian, magenta y amarillo. Implementado por la industria de la impresión.
- YIQ: separa la información de luminancia de la del color. Empleado en la transmisión de TV.

Fuente: *Imaq Vision Concepts Manual*. Capítulo 14.



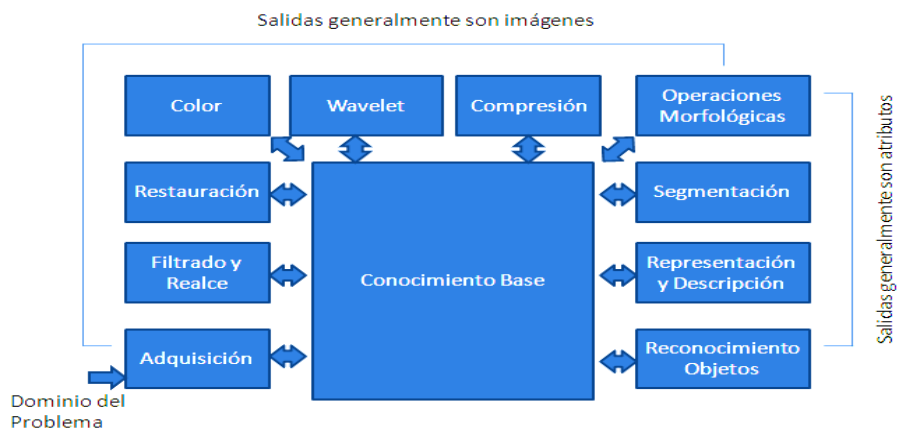
### A.1.3. ¿Cómo se obtiene una imagen?

Un sistema de adquisición y procesamiento de imágenes de propósito general típicamente está constituido por 4 elementos fundamentales<sup>22</sup>:

- a. Un sistema de adquisición de imágenes. En el caso más simple, éste podría ser una cámara CCD ó una filmadora.
- b. Un *frame grabber* que convierte la señal eléctrica del sistema de adquisición en una imagen digital que puede ser almacenada.
- c. Una computadora o estación de trabajo que provee poder de procesamiento.
- d. Un software de procesamiento de imágenes que contiene las herramientas necesarias para manipular y analizar las imágenes.

### A.1.4. Pasos fundamentales en el procesamiento digital de imágenes

Fuente: *Digital Image Processing*, Berd Jähne. Capítulo 1.



22 JÄHNE Berd, DIGITAL IMAGE PROCESSING. Capítulo 1.

Resulta útil dividir el tratamiento sobre una imagen en 2 grandes categorías: métodos cuyas entradas y salidas son imágenes y métodos en los cuales las entradas pueden ser imágenes pero las salidas son atributos que se extraen de la imagen<sup>23</sup>. Esta organización se ilustra en la figura 10. El diagrama no implica que todos los procesos se aplican sobre una imagen, sino que la intención es dar a entender que todas estas metodologías se aplican a imágenes con diferentes objetivos.

- Adquisición: básicamente se busca convertir la energía radiada por un objeto en una imagen digital, a través de hardware y software.
- Realce: consiste en manipular una imagen de manera tal que la salida resulte más adecuada que la imagen original para una aplicación específica. La palabra específica toma una importancia significativa, debido a que las técnicas de realce están orientadas hacia un problema en concreto. Por ejemplo, los métodos utilizados para mejorar la calidad de las imágenes de rayos X son completamente diferentes a las usadas para analizar las fotografías enviadas por un satélite. Es el usuario final, ya sea el hombre o un sistema de visión artificial el que decide qué procesos resultan más óptimos<sup>24</sup>.
- Restauración: esta área también se encarga de mejorar la apariencia de una imagen; sin embargo, a diferencia del realce, que es subjetivo, la restauración es objetiva, en el sentido en que estas técnicas tienen como base unos modelos matemáticos y probabilísticos para imágenes degradadas.
- Color: ha obtenido una gran importancia a raíz del incremento del uso de imágenes digitales en Internet. Es una herramienta muy útil debido a 2 aspectos básicamente: en primer lugar, el color es un poderoso descriptor que muchas veces simplifica la identificación y extracción de objetos de una imagen; en segunda instancia, los seres humanos pueden discernir miles de sombras e

---

23 JÄHNE Bernd, DIGITAL IMAGE PROCESSING. Capítulo 1.

24 PRATT WILLIAM K., DIGITAL IMAGE PROCESSING. Capítulo 10.

intensidades de color, comparando apenas con solo dos docenas de sombras en gris<sup>25</sup>.

- Wavelet: son la base para la representación de imágenes en varios grados de resolución. Estas técnicas son también utilizadas en la compresión y en la representación piramidal, en cuyos casos las imágenes son subdivididas en regiones más pequeñas.
- Compresión: son herramientas que tratan de reducir tanto el espacio en memoria requerido para almacenamiento, como el ancho de banda empleado para la transmisión de imágenes. Cabe mencionar que en el primer caso ha habido una evolución significativa, mientras que en el segundo no se puede afirmar lo mismo. Uno de las técnicas más conocidas es el JPEG.
- Operaciones morfológicas: permiten la extracción de componentes de la imagen que resultan útiles en la representación y descripción de formas. Las operaciones de morfologías fundamentales son la dilatación, la erosión y *skeletonization*. En la dilatación, un objeto se expande de manera uniforme, mientras que en la erosión, se encoje. De *skeletonization* resulta una figura delgada que representa el objeto.
- Segmentación: se chequea cada pixel de la imagen para observar si pertenece o no a uno objeto de interés. La idea es realizar una partición de la imagen en sus partes constituyentes u objetos. En general, la segmentación autónoma es una de las tareas más complicadas en el procesamiento digital de imágenes. Una segmentación fuerte brinda la posibilidad de agilizar los procesos que requieren identificar objetos de manera individual. Por otra parte, una segmentación débil prácticamente garantiza fallas en ese mismo tipo de aplicaciones.
- Representación y descripción: usualmente la salida de la etapa de segmentación es información de los pixeles que constituyen, o bien los límites de una región de interés ó todos los puntos de dicha región. En ambos casos, se hace necesario convertir estos datos en una forma adecuada para el

---

<sup>25</sup> GONZALEZ Rafael C., WOODS Richard E., DIGITAL IMAGE PROCESSING. Capítulo 6.

procesamiento en computadores. La primera decisión que debe ser tomada es si los datos deberían ser representados como fronteras o como la región completa. La representación de las fronteras es apropiada cuando el interés se centra en las características de la forma externa, tales como esquinas e inflexiones. La representación regional es beneficiosa cuando la atención radica en las propiedades internas, como la textura o el esqueleto. En muchas aplicaciones, estas representaciones se complementan unas a otras. El método también debe ser especificado para describir los datos, de tal manera que las características de interés sean resaltadas. Descripción o selección de características, trata con la extracción de atributos que resultan en información de interés cualitativa o son la base para diferenciar cierta clase de objetos de otros.

- Reconocimiento de objetos: es el proceso en el cual se asigna una etiqueta a un objeto basado en sus descriptores. Uno de los temas centrales es el concepto de “aprender” de una referencia o *template*. Las 2 principales técnicas se basan en describir los objetos a partir de descriptores cualitativos (como el área, la longitud o la textura), o cuantitativos.

## Anexo 2: Tablas sistema de control de temperatura

Tabla 4. Variación del Voltaje RMS entregado a la carga en función del ángulo de disparo del Triac.

| ALFA                     | Vrms  | Ajuste a polinomio | Error         |
|--------------------------|-------|--------------------|---------------|
| 0                        | 212   | 212,600            | -0,28%        |
| 5                        | 211,7 | 212,427            | -0,34%        |
| 10                       | 210,8 | 211,268            | -0,22%        |
| 15                       | 209,9 | 209,179            | 0,34%         |
| 20                       | 208,2 | 206,220            | 0,95%         |
| 25                       | 206,3 | 202,449            | 1,87%         |
| 30                       | 196,3 | 197,924            | -0,83%        |
| 35                       | 191,1 | 192,703            | -0,84%        |
| 40                       | 185,2 | 186,844            | -0,89%        |
| 45                       | 179   | 180,405            | -0,79%        |
| 50                       | 172,3 | 173,445            | -0,66%        |
| 55                       | 165   | 166,022            | -0,62%        |
| 60                       | 157,5 | 158,193            | -0,44%        |
| 65                       | 149,4 | 150,017            | -0,41%        |
| 70                       | 141,3 | 141,553            | -0,18%        |
| 75                       | 132,5 | 132,858            | -0,27%        |
| 80                       | 123,7 | 123,991            | -0,24%        |
| 85                       | 114,6 | 115,009            | -0,36%        |
| 90                       | 105,2 | 105,971            | -0,73%        |
| 95                       | 96,2  | 96,936             | -0,76%        |
| 100                      | 86,9  | 87,960             | -1,22%        |
| 105                      | 78    | 79,103             | -1,41%        |
| 110                      | 69,2  | 70,422             | -1,77%        |
| 115                      | 61    | 61,977             | -1,60%        |
| 120                      | 53    | 53,824             | -1,55%        |
| 125                      | 45,4  | 46,022             | -1,37%        |
| 130                      | 38,2  | 38,629             | -1,12%        |
| 135                      | 30,5  | 31,704             | -3,95%        |
| 140                      | 25,1  | 25,305             | -0,82%        |
| 145                      | 19,6  | 19,489             | 0,57%         |
| 150                      |       | 14,315             |               |
| 155                      |       | 9,841              |               |
| 160                      |       | 6,126              |               |
| 165                      |       | 3,227              |               |
| 170                      |       | 1,202              |               |
| 175                      |       | 0,111              |               |
| 180                      |       | 0,010              |               |
| <b>Promedio de error</b> |       |                    | <b>-0,66%</b> |

| Muestra | Temperatura | AD595 (mV)<br>26   | ERROR         | Vr<br>recalculado  | ERROR         |
|---------|-------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| 1       | 200         | 201,5              | -0,75%        | 202,97             | -1,48%        |
| 2       | 220         | 221,3              | -0,59%        | 221,95             | -0,89%        |
| 3       | 240         | 241,3              | -0,54%        | 241,13             | -0,47%        |
| 4       | 260         | 261,4              | -0,54%        | 260,39             | -0,15%        |
| 5       | 280         | 281,7              | -0,61%        | 279,86             | 0,05%         |
| 6       | 300         | 302,2              | -0,73%        | 299,51             | 0,16%         |
| 7       | 320         | 322,7              | -0,84%        | 319,16             | 0,26%         |
| 8       | 340         | 343,4              | -1,00%        | 339,01             | 0,29%         |
| 9       | 360         | 364,1              | -1,14%        | 358,85             | 0,32%         |
| 10      | 380         | 384,9              | -1,29%        | 378,79             | 0,32%         |
| 11      | 400         | 405,7              | -1,43%        | 398,73             | 0,32%         |
| 12      | 420         | 426,6              | -1,57%        | 418,77             | 0,29%         |
| 13      | 440         | 447,6              | -1,73%        | 438,90             | 0,25%         |
| 14      | 460         | 468,6              | -1,87%        | 459,03             | 0,21%         |
| 15      | 480         | 489,6              | -2,00%        | 479,17             | 0,17%         |
| 16      | 500         | 510,7              | -2,14%        | 499,39             | 0,12%         |
| 17      | 520         | 531,8              | -2,27%        | 519,62             | 0,07%         |
| 18      | 540         | 552,9              | -2,39%        | 539,85             | 0,03%         |
| 19      | 560         | 574                | -2,50%        | 560,08             | -0,01%        |
| 20      | 580         | 595                | -2,59%        | 580,21             | -0,04%        |
| 21      | 600         | 616,1              | -2,68%        | 600,44             | -0,07%        |
| 22      | 620         | 637,1              | -2,76%        | 620,57             | -0,09%        |
| 23      | 640         | 658,1              | -2,83%        | 640,70             | -0,11%        |
| 24      | 660         | 679                | -2,88%        | 660,74             | -0,11%        |
| 25      | 680         | 699,8              | -2,91%        | 680,68             | -0,10%        |
| 26      | 700         | 720,6              | -2,94%        | 700,62             | -0,09%        |
| 27      | 720         | 741,3              | -2,96%        | 720,47             | -0,06%        |
| 28      | 740         | 761,9              | -2,96%        | 740,21             | -0,03%        |
| 29      | 760         | 782,5              | -2,96%        | 759,96             | 0,00%         |
|         |             | <b>Error medio</b> | <b>-1.88%</b> | <b>Error medio</b> | <b>-0.03%</b> |

<sup>26</sup> ANALOG DEVICES. AD595/AD595 datasheet. Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

| Tiempo (m) | Temperatura (°C) | Diferencia (°C) | Tiempo (m) | Temperatura (°C) | Diferencia (°C) |
|------------|------------------|-----------------|------------|------------------|-----------------|
| 0          | 25               | -               | 43         | 414              | 10              |
| 1          | 26               | 1               | 44         | 423              | 9               |
| 2          | 27               | 1               | 45         | 433              | 10              |
| 3          | 29               | 2               | 46         | 444              | 11              |
| 4          | 32               | 3               | 47         | 453              | 9               |
| 5          | 35               | 3               | 48         | 462              | 9               |
| 6          | 40               | 5               | 49         | 472              | 10              |
| 7          | 45               | 5               | 50         | 481              | 9               |
| 8          | 51               | 6               | 51         | 489              | 8               |
| 9          | 58               | 7               | 52         | 497              | 8               |
| 10         | 65               | 7               | 53         | 505              | 8               |
| 11         | 73               | 8               | 54         | 513              | 8               |
| 12         | 81               | 8               | 55         | 522              | 9               |
| 13         | 90               | 9               | 56         | 529              | 7               |
| 14         | 100              | 10              | 57         | 537              | 8               |
| 15         | 110              | 10              | 58         | 544              | 7               |
| 16         | 120              | 10              | 59         | 552              | 8               |
| 17         | 130              | 10              | 60         | 559              | 7               |
| 18         | 141              | 11              | 61         | 565              | 6               |
| 19         | 152              | 11              | 62         | 573              | 8               |
| 20         | 163              | 11              | 63         | 580              | 7               |
| 21         | 175              | 12              | 64         | 586              | 6               |
| 22         | 187              | 12              | 65         | 592              | 6               |
| 23         | 198              | 11              | 66         | 599              | 7               |
| 24         | 210              | 12              | 67         | 604              | 5               |
| 25         | 222              | 12              | 68         | 610              | 6               |
| 26         | 231              | 9               | 69         | 617              | 7               |
| 27         | 244              | 13              | 70         | 624              | 7               |
| 28         | 255              | 11              | 71         | 630              | 6               |
| 29         | 266              | 11              | 72         | 636              | 6               |
| 30         | 276              | 10              | 73         | 642              | 6               |
| 31         | 287              | 11              | 74         | 648              | 6               |
| 32         | 298              | 11              | 75         | 654              | 6               |
| 33         | 310              | 12              | 76         | 661              | 7               |
| 34         | 320              | 10              | 77         | 666              | 5               |
| 35         | 330              | 10              | 78         | 673              | 7               |
| 36         | 341              | 11              | 79         | 678              | 5               |
| 37         | 351              | 10              | 80         | 683              | 5               |
| 38         | 362              | 11              | 81         | 689              | 6               |
| 39         | 372              | 10              | 82         | 694              | 5               |
| 40         | 382              | 10              | 83         | 699              | 5               |
| 41         | 393              | 11              | 84         | 704              | 5               |
| 42         | 404              | 11              | 85         | 708              | 4               |

### Anexo 3. Programa principal microcontrolador

```
#include <hidef.h> /* for EnableInterrupts macro */
#include "derivative.h" /* include peripheral declarations */
#include "Usb_Drv.h"
#include "Usb_Config.h"
#include "adc.h"
#include "gpio.h"
#include "Usr_Ep_Handler.h"
#include "MCU.h"
#include "FSLTypes_File.h" /* FSL Standar Definitions */

const byte NVOPT_INIT @0x0000FFBF = 0x02; /*to bootloader
const byte NVPROT_INIT @0x0000FFBD = 0Xfa /*to bootloader
extern void _Startup(void);

/*Local function definition*/
void Init_Sys(void);

interrupt void Dummy_ISR(void) {
}
#define READ_ANALOG_DATA 0xD0
#define WRITE_ALFA 0xE0
int ALFA=1;

void main(void)
{
int x,y;
Init_Sys(); /*initial the system*/
EnableInterrupts; /* enable interrupts */
```

```

for(;;)
{
__RESET_WATCHDOG();           /* feeds the dog */
Check_USBBus_Status();       /* Must use polling method*/
if (CheckEndPointOUT(EP3))
{
if (EP3_Buffer[0] == WRITE_ALFA)
{
x = EP3_Buffer[1];
y = x*69;
ALFA = y;
}
else if (EP3_Buffer[0] == READ_ANALOG_DATA)
{
//Read analog data and send it through EP4
EP4_Buffer[0] = READ_HIGH();
EP4_Buffer[1] = READ_LOW();
EndPoint_IN(EP4,2);
}

}
}
}

/* INTERRUPTS */
void interrupt VectorNumber_Virq IRQ_ISR(void) {

TPM1C0V = ALFA;           /* Valor a variar según el disparo ALFA.
TPM1C1V = 12400;         /* ajuste segundo timer.
TPM1C2V = ALFA+12500;    /*ajuste tercer timer.

```

```

    TPM1C3V = 24800;           //ajuste cuarto timer.
    TPM1CNTL = 0x00;          //reinicializar el conteo del TMP1
    TPM1C0SC_CH0IE = 1;      //Set bit para habilitar la interrupción del
TPM1C0
    TPM1C0SC_CH0F = 0;        /* Clears timer flag */
    TPM1C1SC_CH1IE = 1;      //Set este bit para habilitar la interrupción del
TPM1C1
    TPM1C1SC_CH1F = 0;
    TPM1C2SC_CH2IE = 1;      //Set habilita interrupción TPM1C2
    TPM1C2SC_CH2F = 0;
    TPM1C3SC_CH3IE = 1;      //Set habilita interrupción TPM1C3
    TPM1C3SC_CH3F = 0;
    IRQSC_IRQPE = 0;         //Deshabilito PIN IRQ para evitar falsos flancos.
    IRQSC_IRQACK = 1;        //Set este bit para borrar la bandera de int IRQ
}
void interrupt VectorNumber_Vtpm1ch0 TPM1_ISR(void) {

    TRIAC = 1;               //Salida a 1.
    TPM1C0SC_CH0F = 0;        /* Clears timer 1 ch 0 flag */
    TPM1C0SC_CH0IE = 0;      //Deshabilita interrupción de TPM3C0
}
void interrupt VectorNumber_Vtpm1ch1 TPM2_ISR(void) {

    TRIAC = 0;               /* force PTC0_PTC05 = 0; */
    TPM1C1SC_CH1F = 0;        /* Clears timer 1 ch 1 flag */
    TPM1C1SC_CH1IE = 0;      //Deshabilita interrupción de TPM1C1
}
void interrupt VectorNumber_Vtpm1ch2 TPM3_ISR(void) {

    TRIAC = 1;

```

```

    TPM1C2SC_CH2F = 0;           /* Clears timer 1 ch 2 flag */
    TPM1C2SC_CH2IE = 0;         //Deshabilita interrupción de TPM3C2
}
void interrupt VectorNumber_Vtpm1ch3 TPM4_ISR(void) {

    TRIAC = 0;
    TPM1C3SC_CH3F = 0;           /* Clears timer 3 ch 3 flag */
    TPM1C3SC_CH3IE = 0;         //Deshabilita interrupción de TPM3C3
    IRQSC_IRQPE = 1;           //Habilita PIN IRQ.
    IRQSC_IRQACK = 1;          //Set este bit para borrar la bandera de int IRQ
}

void Init_Sys(void)
{
    Mcu_Init();                 /* MCU general Initialization */
    MCG_Init();                 /* Initialize the MCG module to generate 24MHz bus
clock */
    GPIO_Init();
    ADC_Init();
    Initialize_USBModule();
    TPM_int();                 /* Function that initializes the TPM module */
    return;
}

// El código que sigue es para escribir memoria flash por medio de bootloader.
void (* volatile const _UserEntry[])(void)@0xFBBC={
    0x9DCC,                    /* asm NOP(9D), asm JMP(CC)*/
    _Startup
};

```

```

void (* volatile const _Usr_Vector[])(void)@0xFBC4=
{
    Dummy_ISR,      /* Int.no.29 RTC          (at FFC4) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.28 IIC          (at FFC8) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.27 ACMP        (at FFC8) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.26 ADC          (at FFCA) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.25 KBI         (at FFCC) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.24 SCI2 Transmit (at FFCE) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.23 SCI2 Receive (at FFD0) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.22 SCI2 Error   (at FFD2) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.21 SCI1 Transmit (at FFD4) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.20 SCI1 Receive (at FFD8) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.19 SCI1 error   (at FFD8) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.18 TPM2 Overflow (at FFDA) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.17 TPM2 CH1     (at FFDC) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.16 TPM2 CH0     (at FFDE) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.15 TPM1 Overflow (at FFE0) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.14 TPM1 CH5     (at FFE2) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.13 TPM1 CH4     (at FFE4) */
    TPM4_ISR,       /* Int.no.12 TPM1 CH3     (at FFE8) */
    TPM3_ISR,       /* Int.no.11 TPM1 CH2     (at FFE8) */
    TPM2_ISR,       /* Int.no.10 TPM1 CH1     (at FFEA) */
    TPM1_ISR,       /* Int.no.9  TPM1 CH0     (at FFEC) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.8  Reserved     (at FFEE) */
    USB_ISR,        /* Int.no.7  USB Statue   (at FFF0) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.6  SPI2         (at FFF2) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.5  SPI1         (at FFF4) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.4  Loss of lock  (at FFF6) */
    Dummy_ISR,      /* Int.no.3  LVI          (at FFF8) */
    IRQ_ISR,        /* Int.no.2  IRQ          (at FFFA) */

```

```

Dummy_ISR,    /* Int.no.1 SWI          (at FFFC) */
};

#pragma CODE_SEG Bootloader_ROM
void Bootloader_Main(void);
void _Entry(void)
{
/* Initialization I/O for enter bootloader mode */
    PTGD = 0x00;
    PTGDD = 0xF0;          /*PTG0-3 used for KBI input*/
    PTGPE = 0x0F;          /*Pull-up enable */

/* MCG clock initialization, fBus=24MHz
    MCGC2 = 0x38;
while(!(MCGSC & 0x02));    /*wait for the OSC stable
MCGC1 = 0x1B;
MCGC3 = 0x48;
while ((MCGSC & 0x48) != 0x48);    /*wait for the PLL is locked
/* Flash clock*/
FCDIV=0x4E;    /* PRDIV8=1; DIV[5:0]=14, flash clock should be 150-
200kHz*/
/* bus clock=24M, flash clock=fbus/8/(DIV[5:0]+1) */
/* Mode Determination*/
if(!PTGD_PTGD0)    /* PTG0 is pressed*/
{
SOPT1 = 0x20;    /* disable COP*/
USBCTL0=0x44;    /* Initialize on-chip regulator and pullup resistor*/
Bootloader_Main();    /* Bootloader mode*/
}
else

```

```
asm JMP _UserEntry; /* Enter User mode*/  
}  
  
#pragma CODE_SEG default
```